

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANA D'OREY GAIVÃO PORTELLA

**AVALIAÇÃO DA PRESENÇA DE INDICADORES DE OXIDAÇÃO DO PAPEL
ISOLANTE TERMOESTABILIZADO EM EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÃO**

CURITIBA

2010

MARIANA D'OREY GAIVÃO PORTELLA

**AVALIAÇÃO DA PRESENÇA DE INDICADORES DE OXIDAÇÃO DO PAPEL
ISOLANTE TERMOESTABILIZADO EM EQUIPAMENTOS DE SUBESTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia (PIPE), Área de Concentração em Engenharia e Ciências de Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Dr. Vitoldo Swinka Filho
Co-Orientador: Dr. Guilherme Cunha da Silva

CURITIBA

2010

À minha mãe,
Margarida Maria Andrade de Orey Gaivão Portella
(*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e pela luz em todos os momentos.

Ao meu pai, Dr. Kleber Franke Portella, pelo apoio, amor, colo e incentivo desde os meus primeiros anos de estudo, às vezes como pai, outras como amigo, muitas como professor.

Ao meu irmão, Guilherme d'Orey Gaivão Portella, e aos meus avós, tios e primos, que, apesar da distância, acompanharam e deram força a cada passo desta caminhada.

Ao meu namorado, Luciano Martignoni Bragança, pelas incontáveis demonstrações de carinho, companhia, paciência e compreensão, fundamentais durante a realização deste trabalho.

A todos os meus amigos e amigas, em especial à Aline Pereira, Heloisa Zanin, Maria Clara Pereira e Mariana Mansur Santos, que mesmo sem entender muito, ouviram atentamente cada uma das minhas indagações, dando força nos momentos difíceis e cansativos e vibrando com cada resultado e superação.

À coordenação, professores e funcionários do Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Paraná.

Aos colegas e amigos do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, Douglas Batista, Daiane Sabec, Cleberson Ribeiro, Guilherme Stocco, Claudio Deger, Leandro Feitosa, Viviane Calixto e Francielli Cazuni, que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

À Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista e ao LACTEC, Departamento de Tecnologia em Materiais, Gerente Dr. Ricardo José Ferracin, pela oportunidade e confiança depositadas para o desenvolvimento do projeto.

Agradeço especialmente aos professores Dr. Vitoldo Swinka Filho e Dr. Guilherme Cunha da Silva, pela orientação, ensinamentos e paciência ao longo

da realização da pesquisa.

E a todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

RESUMO

O sistema de isolamento compõe uma das partes mais importantes do transformador elétrico. Uma vez que a tecnologia desenvolvida até hoje não permite a regeneração do papel Kraft durante a operação do equipamento, a qualidade deste material é elemento chave na manutenção, com a análise do furfuraldeído (2-FAL) dissolvido em óleo mineral isolante (OMI). Ao longo dos últimos anos, pesquisas investiram no desenvolvimento de materiais capazes de suportar condições mais severas de temperatura e esforço mecânico, como o papel Kraft termoestabilizado. Paralelamente a esta iniciativa, surge a necessidade de desenvolvimento de estudos que visem diagnosticar de forma rápida, direta ou indiretamente, os processos degenerativos envolvidos. Assim, neste trabalho, pelo envelhecimento em estufas de sistemas contendo óleo e papel isolante, foi possível simular o estresse térmico ao qual um transformador de potência está sujeito, verificando as alterações nas propriedades dos materiais envolvidos, de modo a comparar o envelhecimento dos sistemas de isolamento sólido termoestabilizado e convencional. Para tal, foram realizados ensaios sob OMI e papel envelhecidos termicamente, permitindo não somente o estudo destes sujeitos a uma única condição, como também a interação de ambos, a influência de um incremento de temperatura e a comparação de dois materiais diferentes. Em um primeiro momento foram realizados os ensaios físico-químicos em OMI, para verificar a alteração das propriedades do material, bem como a presença de apenas estresse térmico, sendo realizada uma comparação com os dados de equipamentos de campo. Notou-se uma diminuição gradativa da tensão interfacial, bem como aumento leve do fator de potência do óleo, o que comprovou o envelhecimento do material. Paralelamente, foi realizado o estudo da degradação do isolamento sólido, por meio de ensaios de grau de polimerização (GP), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Resistência à Tração sob as amostras envelhecidas em laboratório. Os resultados obtidos comprovaram a menor resistência do papel convencional em relação ao termoestabilizado, devido ao decaimento do GP, aparecimento de falhas e diminuição da densidade de fibras e com o aumento da fragilidade mecânica do material. Produtos indicadores da degradação do papel isolante em equipamentos elétricos, os compostos furânicos (CF) foram avaliados frente à diminuição do GP do isolamento sólido, de modo a desenvolver um estudo comparativo entre ambos os tipos de materiais existentes e que propiciasse uma análise diferenciada dos ensaios de manutenção de transformadores. O 2-FAL apresentou um comportamento padrão, com o aumento de sua concentração com o tempo de envelhecimento para o papel convencional. Porém, para o isolamento termoestabilizado, confirmando algumas pesquisas da literatura, o único composto que apresentou resultado foi o álcool furfurílico (2-FOL), sendo verificada a dissolução do composto em óleo para GP a partir de 900 e a formação de curvas de evolução de aumento suave, porém pouco gradual ou constante. Tal resposta do óleo em relação à degradação térmica do papel termoestabilizado se mostrou interessante para a manutenção, uma vez que foi verificado que o acompanhamento desenvolvido deverá ser realizado de forma diferente daquele aplicado ao papel convencional de modo a visar diminuição da possibilidade de ocorrência de falhas.

Palavras Chave: Compostos Furânicos. Degradação. Envelhecimento. Grau de Polimerização. Papel Isolante. Transformador de Potência.

ABSTRACT

The insulating system is the most important part of an electric transformer. Since the technology developed up-to-date is not capable to regenerate Kraft paper during the machine operation, its quality is a key element to perform predictive maintenance, which is evaluated through the analysis of 2-FAL dissolved in insulating mineral oil (OMI). In the last years, researchers has invested in the development of materials capable of supporting more severe conditions such as temperature and mechanical stress, like the thermally upgraded Kraft paper. Simultaneously, researchers have been studying manners to direct or indirectly diagnose the degenerative processes involved. In this project, the thermal ageing of OMI and insulating paper was used to simulate the thermal stress to which the electric transformer is susceptible. By the verification of alterations in its materials, the ageing of solid isolation systems (conventional and thermally upgraded paper) can be evaluated and compared. In order to achieve that, thermally aged OMI and paper were analyzed to allow: the study of them separately, of the interaction between liquid and solid insulations, the influence of temperature increments on the systems, and the comparison between the two different kinds of materials. First of all, physical-chemical analyses were realized in OMI samples to verify the simulation of an electric equipment life cycle and the existence of thermal effects alone. This results were analyzed considering data collected from field electric transformers. It has been noted a gradual reduction of the interfacial tension and light increasement of oil dielectric losses which confirmed the ageing of the material. Simultaneously, the study assessed the paper degradability, measuring the degree of polymerization (GP), mechanical resistance and the micro structural conditions (by MEV) of samples aged in laboratory. The results confirmed the greater resistance of thermally upgraded paper in comparison to the conventional one, as the GP decay, the failure and the fiber density decreasement (MEV) and with the lower values for mechanical fragility. Products that indicates the degradability of insulating paper in electric equipments, the oil furanic compounds were evaluated simultaneously with the paper GP decay, to developed a comparative study between solid insulation and to provide innovatory way to perform the predictive maintenance of transformers. The 2-FAL presented standard behavior, increasing the concentration in oil with the ageing time for conventional insulation. But, for thermally upgraded paper, confirming the information collected from literature, the unique compound that presented results was the 2-FOL, that was founded dissolved in oil as the GP dacay lowered from 900 and the formation of smooth, less gradual and less constant evolution curves. That answer of the oil in the thermal degradation of paper is really interesting to the maintenance activities, because was verified that the monitoring of the both kinds of paper are different and it have to be considered in order to try to decrease the occurrence of failures.

Keywords: Furanic Compounds. Degradation. Aging. Degree of Polymerization. Paper Insulation. Electric Transformer.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO NÚCLEO DE UM TRANSFORMADOR.	22
FIGURA 2 – EXEMPLOS DE CADEIAS PARAFÍNICAS (A) LINEAR E (B) RAMIFICADA). FONTE: (LACTEC, 1991).....	24
FIGURA 3 –EXEMPLO DE CADEIA NAFTÊNICA.	25
FIGURA 4 –ESTRUTURA BASE DOS HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS.	25
FIGURA 5 – RESULTADOS DO ESTUDO DESENVOLVIDO POR MARTINS, 2007, PARA A VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA, OXIGÊNIO E UMIDADE NA DEGRADAÇÃO DO ISOLAMENTO SÓLIDO DE UM TRANSFORMADOR.....	32
FIGURA 6 – ESTRUTURA MOLECULAR DOS COMPOSTOS FURÂNICOS.	33
FIGURA 7 – CURVA LOGARÍTMICA DE CORRELAÇÃO ENTRE GP E CONCENTRAÇÃO DE 2-FAL	37
FIGURA 8 – FRASCOS DE VIDRO DE 250 ML, DO TIPO DBO (MARCA COMERCIAL CORNING), COM TAMPA ESMERILHADA, UTILIZADOS PARA O ENVELHECIMENTO DAS AMOSTRAS.	44
FIGURA 9 – BORBULHAMENTO DE GÁS NITROGÊNIO NOS SISTEMAS ÓLEO/ PAPEL ANTES DO INÍCIO DO ENVELHECIMENTO.	44
FIGURA 10 –AMOSTRAS DE BRANCO, SUJEITAS A UM ENVELHECIMENTO NA TEMPERATURA AMBIENTE E ABRIGADAS DA LUZ DURANTE 63 DIAS.	45
FIGURA 11 –DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS NO INTERIOR DAS ESTUFAS DE ENVELHECIMENTO TÉRMICO.	45
FIGURA 12 – SEPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ÓLEO E PAPEL E ADEQUADA IDENTIFICAÇÃO.....	46
FIGURA 13 – CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PAPEL TERMOESTABILIZADO E CONVENCIONAL PELA ANÁLISE FTIR.	60
FIGURA 14 – MICROGRAFIAS POR MEV DO PAPEL: (A) CONVENCIONAL E (B) TERMOESTABILIZADO (150X).	61
FIGURA 15 – MICROGRAFIAS POR MEV DO PAPEL: (A) CONVENCIONAL E (B) TERMOESTABILIZADO (1000X).	61
FIGURA 16 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO INTERFACIAL EM ÓLEO AO LONGO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO.	63
FIGURA 17 – RESULTADOS OBTIDOS PARA A TENSÃO INTERFACIAL DAS AMOSTRAS DE OMI COLETADAS.	64

FIGURA 18 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE NEUTRALIZAÇÃO EM OMI AO LONGO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO.	65
FIGURA 19 – RESULTADOS OBTIDOS PARA O ÍNDICE DE NEUTRALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE OMI COLETADAS.....	66
FIGURA 20 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM ÓLEO AO LONGO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO.	67
FIGURA 21 – RESULTADOS OBTIDOS PARA FATOR DE POTÊNCIA A 90 °C DAS AMOSTRAS DE OMI COLETADAS.....	68
FIGURA 22 – EXEMPLO DE CROMATOGRAMA OBTIDO PARA AMOSTRA DE ÓLEO ENVELHECIDO COM PAPEL CONVENCIONAL.....	69
FIGURA 23 – EXEMPLO DE CROMATOGRAMA OBTIDO PARA AMOSTRA DE ÓLEO ENVELHECIDO COM PAPEL TERMOESTABILIZADO.....	69
FIGURA 24 – EXEMPLO DE ESPECTRO OBTIDO PARA AMOSTRA DE ÓLEO ENVELHECIDO COM PAPEL CONVENCIONAL.	70
FIGURA 25 – EXEMPLO DE ESPECTRO OBTIDO PARA AMOSTRA DE ÓLEO ENVELHECIDO COM PAPEL TERMOESTABILIZADO.	70
FIGURA 26 – GRÁFICO DA CONCENTRAÇÃO DOS COMPOSTOS FURÂNICOS FORMADOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO (0 A 50 DIAS), PARA O OMI E PAPEL KRAFT A 100 °C.	71
FIGURA 27 – GRÁFICO DA CONCENTRAÇÃO DOS COMPOSTOS FURÂNICOS FORMADOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO (50 A 240 DIAS), PARA O OMI E PAPEL KRAFT A 100 °C.	72
FIGURA 28 – GRÁFICO DA CONCENTRAÇÃO DOS COMPOSTOS FURÂNICOS FORMADOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO (0 A 50 DIAS), PARA O OMI E PAPEL KRAFT A 125 °C.	72
FIGURA 29 – GRÁFICO DA CONCENTRAÇÃO DOS COMPOSTOS FURÂNICOS FORMADOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO (50 A 240 DIAS), PARA O OMI E PAPEL KRAFT A 125 °C.	73
FIGURA 30 – RESULTADOS OBTIDOS PARA A CONCENTRAÇÃO DE 2-FAL DAS AMOSTRAS DE OMI COLETADAS.....	75
FIGURA 31 – RESULTADOS OBTIDOS PARA CONCENTRAÇÃO DE 5-HMF DAS AMOSTRAS DE OMI COLETADAS.....	76
FIGURA 32 – GRÁFICO DA CONCENTRAÇÃO DE 2-FAL COLORIMÉTRICO FORMADO PELO TEMPO, PARA ENVELHECIMENTO DE OMI E PAPEL KRAFT A 100 °C.....	77
FIGURA 33 – ESCALA CRONOLÓGICA DE COLORAÇÃO DAS AMOSTRAS DE 2-FAL COLORIMÉTRICO AO LONGO DO	

ENVELHECIMENTO DE OMI COM PAPEL TERMOESTABILIZADO DE 7 A 240 DIAS.	77
FIGURA 34 – ESCALA CRONOLÓGICA DE COLORAÇÃO DAS AMOSTRAS DE 2-FAL COLORIMÉTRICO AO LONGO DO ENVELHECIMENTO DE OMI COM PAPEL CONVENCIONAL DE 7 A 240 DIAS.....	78
FIGURA 35 – SOBREPOSIÇÃO DOS ESPECTROS DE UV PARA O ENVELHECIMENTO DE ÓLEO E PAPEL TERMOESTABILIZADO SUBMETIDO A 100 °C.	79
FIGURA 36 – SOBREPOSIÇÃO DOS ESPECTROS DE UV PARA O ENVELHECIMENTO DE ÓLEO E PAPEL CONVENCIONAL SUBMETIDO A 100 °C.....	79
FIGURA 37 – CURVAS DE TGA PARA AMOSTRAS DE OMI NOVO E ENVELHECIDO POR 240 DIAS A 100 °C, TANTO PARA PAPEL CONVENCIONAL, QUANTO TERMOESTABILIZADO.....	80
FIGURA 38 – CURVAS DE TGA PARA AMOSTRAS DE PAPEL CONVENCIONAL E TERMOESTABILIZADO AO LONGO DO ENVELHECIMENTO A 100 °C.....	81
FIGURA 39 – VARIAÇÃO TEMPORAL DO GP DO PAPEL ENVELHECIDO A 100 °C.	82
FIGURA 40 – VARIAÇÃO TEMPORAL DO GP DO PAPEL ENVELHECIDO A 125 °C.	83
FIGURA 41 – ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DAS AMOSTRAS DE PAPEL PELA ANÁLISE DE MEV, COM AMPLIAÇÃO DE 150X, PARA PAPEL (A) CONVENCIONAL – 7 DIAS; (B) TERMOESTABILIZADO – 7 DIAS; (C) CONVENCIONAL – 43 DIAS; (D) TERMOESTABILIZADO – 43 DIAS; (E) CONVENCIONAL – 119 DIAS; (F) TERMOESTABILIZADO – 119 DIAS; (G) CONVENCIONAL – 240 DIAS; (H) TERMOESTABILIZADO – 240 DIAS.....	85
FIGURA 42 – ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DAS AMOSTRAS DE PAPEL PELA ANÁLISE DE MEV, COM AMPLIAÇÃO DE 1000X, PARA FIBRAS DE PAPEL (A) CONVENCIONAL – 7 DIAS; (B) TERMOESTABILIZADO – 7 DIAS; (C) CONVENCIONAL – 43 DIAS; (D) TERMOESTABILIZADO – 43 DIAS; (E) CONVENCIONAL – 119 DIAS; (F) TERMOESTABILIZADO – 119 DIAS; (G) CONVENCIONAL – 240 DIAS; (H) TERMOESTABILIZADO – 240 DIAS.	86
FIGURA 43 – ESPECTROS EDS PARA AMOSTRAS DE PAPEL CONVENCIONAL (A) E TERMOESTABILIZADO (B), ENVELHECIDAS AO LONGO DE 7 DIAS.	87
FIGURA 44 – ESPECTROS EDS PARA AMOSTRAS DE PAPEL CONVENCIONAL (A) E TERMOESTABILIZADO (B), ENVELHECIDAS AO LONGO DE 240 DIAS.	87

FIGURA 45 – GRÁFICO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO, PARA PAPEL KRAFT CONVENCIONAL E TERMOESTABILIZADO.....	89
FIGURA 46 – CURVA DE ENVELHECIMENTO DO SISTEMA ÓLEO/PAPEL A 100 °C, DE 0 A 50 DIAS.....	90
FIGURA 47 – CURVA DE ENVELHECIMENTO DO SISTEMA ÓLEO/PAPEL A 100 °C, DE 50 A 240 DIAS.....	90
FIGURA 48 –CURVA DE ENVELHECIMENTO DO SISTEMA ÓLEO/PAPEL A 125 °C, DE 0 A 50 DIAS.....	91
FIGURA 49 –CURVA DE ENVELHECIMENTO DO SISTEMA ÓLEO/PAPEL A 125 °C, DE 50 A 240 DIAS.....	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO OMI.....	26
TABELA 2 – PLANO DE AMOSTRAGEM DE ACORDO COM O TEMPO DE OPERAÇÃO DO TRANSFORMADOR.....	48
TABELA 3 – RELAÇÃO DE TRANSFORMADORES AMOSTRADOS.	50
TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO DO OMI PETROBRÁS AV-60-IN.....	58
TABELA 5 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA UMIDADE DO PAPEL ISOLANTE.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

[]	– Concentração
ABNT	– Agência Brasileira de Normas Técnicas
ANP	– Agência Nacional de Petróleo
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	– American Society for Testing and Materials
CF	– Compostos Furânicos
CNPq	– Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DBPC	– Di-terci-butil-para-cresol
DNPH	– 2,4-dinitrofenilhidrazina
GP	– Grau de polimerização
EDS	– Sistema de energia dispersiva
FTIR	– Espectroscopia de absorção no infravermelho com transformada de Fourier
HPLC	– Cromatografia líquida de alta resolução e alto desempenho
HPLC-MS	– Cromatografia líquida de alta resolução e alto desempenho com espectroscopia de massa
IEC	– International Electrotechnical Commission
CTEEP	– Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
LACTEC	– Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
MEV	– Microscopia eletrônica de varredura
NBR	– Norma Brasileira
OMI	– Óleo mineral isolante
ppm	– Parte por milhão
ppm m.m ⁻¹	– Parte por milhão em relação à massa

PCB	– Bifenilapoliclorada
PIPE	– Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia
p.p ⁻¹	– Peso por peso
TGA	– Análise termogravimétrica
TG	– Termogravimétrico
UFPR	– Universidade Federal do Paraná
UV-VIS	–Ultravioleta e visível

LISTA DE SÍMBOLOS

2-FAL	– 2-furfuraldeído
2-FOL	– 2-álcool furfurílico
5-HMF	– 5-hidroximetil 2-furfuraldeído
5-MF	– 5-metilfurfural
C	– Carbono
CA	– Carbono aromático
CN	– Carbono naftênico
CP	– Carbono parafínico
$\text{Cu}^{(+ / 2+)}$	– Cátion cobre
$\text{Fe}^{(2+ / 3+)}$	– Cátion ferro
HO°	– Radical hidroxila
HCl	– Ácido clorídrico
KOH	– Hidróxido de potássio
Log	– Logaritmo na base 10
O	– Oxigênio
R	– Radical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	Objetivo Geral.....	19
1.2	Objetivos Específicos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	Transformadores Elétricos.....	21
2.2	Isolamento Líquido – Óleo Mineral Isolante (OMI).....	23
2.2.1	Caracterização do Óleo Mineral Isolante (OMI).....	23
2.2.2	Propriedades físico-químicas	24
2.2.3	Coleta de Amostras de Óleo Mineral Isolante em Equipamentos Energizados.....	26
2.3	Isolamento Sólido	27
2.3.1	Características e Tipos de Papel.....	27
2.3.2	Metodologias de Análise Química	28
2.4	Degradação do Material Isolante.....	29
2.4.1	Degradação do Óleo Mineral Isolante	29
2.4.2	Degradação do Papel Isolante.....	31
2.4.3	Compostos Furânicos.....	33
2.4.4	Correlação entre o aparecimento de 2-FAL e o decaimento do grau de polimerização	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1	Estudo Laboratorial de Envelhecimento Acelerado de Óleo Mineral e Papel Isolante.....	40
3.1.1	Caracterização do Isolamento Líquido – Óleo Mineral Isolante....	40
3.1.2	Caracterização do Isolamento Sólido	41
3.1.3	Envelhecimento do Sistema Óleo/ Papel.....	42
3.1.4	Análise do Envelhecimento do Óleo/Papel.....	45
3.2	Amostragem de Óleo Mineral Isolante do Banco de Equipamentos da Concessionária	46
3.2.1	Máquinas Amostradas	47
3.2.2	Condições de Volume e Acondicionamento	47

3.2.3	Identificação das Amostras.....	47
3.2.4	Procedimento de Coleta	48
3.2.5	Número de Amostras e Distribuição	48
3.2.6	Equipamentos amostrados	49
3.2.7	Envio das Amostras ao Laboratório.....	51
3.2.8	Análises do óleo mineral isolante coletado	51
3.3	Metodologias APlicadas	51
3.3.1	Tensão Interfacial do Óleo Mineral Isolante	51
3.3.2	Índice de Neutralização do Óleo Mineral Isolante	51
3.3.3	Fator de Potência a 90 °C (Óleo Mineral Isolante)	52
3.3.4	Compostos Furânicos em Óleo Mineral Isolante, por Cromatografia em fase Líquida	53
3.3.5	Compostos Furânicos em Óleo Mineral Isolante, por Colorimetria.....	53
3.3.6	Ensaio Termogravimétrico de Óleo Mineral e Papel Isolante	54
3.3.7	Grau de Polimerização do Papel Isolante.....	54
3.3.8	Microscopia Eletrônica de Varredura do Papel Isolante	55
3.3.9	Ensaio Mecânicos de Resistência à Tração do Papel	56
4	RESULTADOS	57
4.1	Estudo Experimental de Envelhecimento Acelerado de Óleo Mineral e Papel Isolante	57
4.1.1	Caracterização do Isolamento Líquido – Óleo Mineral Isolante....	57
4.1.2	Caracterização do Isolamento Sólido	59
4.2	Metodologias Aplicadas.....	61
4.2.1	Tensão Interfacial do Óleo Mineral Isolante	62
4.2.2	Índice de Neutralização do Óleo Mineral Isolante	64
4.2.3	Fator de Potência do Óleo Mineral Isolante a 90 °C.....	66
4.2.4	Compostos Furânicos em Óleo Mineral Isolante, por Cromatografia em fase Líquida	68
4.2.5	Compostos Furânicos em OMI, por Colorimetria.....	76
4.2.6	Ensaio Termogravimétrico de Óleo Mineral e Papel Isolante	80
4.2.7	Grau de Polimerização do Papel Isolante.....	82
4.2.8	Microscopia Eletrônica de Varredura do Papel Isolante	84
4.2.9	Ensaio Mecânicos de Resistência à Tração do Papel	88

4.3	Correlação entre a formação de compostos furânicos e o decaimento do Grau de Polimerização	89
5	CONCLUSÃO	93
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
	ANEXO.....	102

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, o marco inicial da utilização de eletricidade no Brasil se deu em 1879, na Estação Central da Estrada de Ferro Dom Pedro II, no Rio de Janeiro, no mesmo ano da invenção da lâmpada pelo cientista norte-americano Thomas A. Edison. Este evento aconteceu com a instalação de dois dínamos para a iluminação de 6 lâmpadas da central, via conversão da energia mecânica em elétrica pelo fenômeno de indução eletromagnética. Mais tarde, o país teve a sua primeira usina de geração de energia, uma termoeletrica de 52 kW de potência, instalada no distrito de Campos – RJ, a qual permitiu sua utilização em iluminação pública (ANEEL, 2008).

Do início do século XX para os dias de hoje, a eletricidade tornou-se uma das formas de energia mais utilizadas pela humanidade, possuindo o Brasil, ao final de 2009, uma capacidade instalada de 106,3 mil MW (ANEEL, 2010). Paralelo ao largo uso da tecnologia, surgiu a dependência da sociedade moderna ao conforto, à comodidade e à praticidade disponibilizados, bem como a susceptibilidade da mesma às falhas do sistema elétrico, obrigando o avanço das pesquisas no sentido de melhorar a qualidade do serviço prestado (SCARDAZZI, 2007).

Um equipamento de fundamental importância no sistema elétrico é o transformador de potência (BATISTA, 2005), sendo as principais partes os seus sistemas de isolamento constituídos, basicamente, por um líquido isolante (comumente a base de óleo mineral isolante, OMI) e uma isolação sólida, frequentemente, o papel Kraft (TULIO, 2008). Não passível de regeneração o papel é, praticamente, o elemento responsável pela definição da vida útil do transformador, diferente do óleo que pode ser tratado ou regenerado para ser novamente utilizado (KOHTOH, KANEKO, OKABE, & AMIMOTO, 2009). Em função destes fatos, há constantes preocupações no desenvolvimento de diferentes técnicas de análise e de fabricação dos seus materiais constituintes para obtê-los com maior qualidade para suportar ao multiestressamento a que estão sujeitos (STORELLI, 20_). Também, há interesse em estudos que visem diagnosticar de forma rápida, direta ou indiretamente, os processos degenerativos envolvidos, facilitando a manutenção

preventiva destes equipamentos elétricos (BARRETO JR, PESENTI, & CHAVES, 1999).

Esta dissertação foi desenvolvida levando-se em consideração o estudo de transformadores de potência, em função da análise prévia dos produtos de degradação do papel Kraft, provenientes do seu envelhecimento térmico em laboratório ou de equipamentos de campo.

Compõem este trabalho 6 capítulos, sendo o primeiro dedicado a uma breve introdução do assunto abordado, bem como a apresentação dos objetivos gerais e específicos da pesquisa. No segundo capítulo é feita uma revisão da literatura sobre transformadores de potência, sistemas de isolamento a base de óleo mineral e papel Kraft, além dos processos degenerativos ao longo da vida útil do equipamento elétrico. No terceiro capítulo, estão apresentadas as características dos materiais, os principais equipamentos utilizados e as metodologias empregadas para estudo do envelhecimento de OMI e papel Kraft tanto em escala laboratorial, quanto para amostras coletadas em subestações. No quarto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste estudo, o qual é devidamente concluído no capítulo 5. No capítulo seis são apresentadas as propostas para trabalhos futuros que darão continuidade à pesquisa desenvolvida.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar comparativamente a formação de compostos furânicos (CF) do papel isolante termoestabilizado e do papel isolante convencional, a partir da utilização de metodologias de ensaio indiretas no óleo mineral isolante (OMI), baseadas nas técnicas de Cromatografia Líquida de Alta Pressão e Alta Resolução (HPLC), paralelamente à degradação do isolamento sólido.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desta dissertação foram:

- desenvolver um envelhecimento térmico acelerado, em laboratório, para verificação comparativa da degradação de sistemas OMI/papel termoestabilizado/cobre e OMI/papel convencional/cobre;
- aplicar as metodologias consagradas de colorimetria e HPLC para a análise dos CF formados no OMI das amostras envelhecidas, oriundos da degradação do papel isolante;
- verificar, paralelamente ao método anterior, a degradação do papel isolante convencional e do termoestabilizado por meio da realização de ensaios de grau de polimerização (GP), da resistência à tração e, de forma alternativa, por técnicas de micro análise como a microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- aplicar método de análise termogravimétrica (TGA) para caracterização dos materiais envolvidos e verificação da alteração de suas propriedades e características ao longo do envelhecimento térmico;
- verificar a eficácia dos estudos conduzidos em laboratório sobre amostras coletadas de equipamentos de subestação, de modo a determinar a confiabilidade do estudo em escala piloto e a aplicabilidade dos métodos estudados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRANSFORMADORES ELÉTRICOS

Na mesma década do marco inicial de energia elétrica no Brasil, houve o início da história dos transformadores de potência, sendo o primeiro desenvolvido em 1885, nos Estados Unidos, bastante diferente do que se tem atualmente, com o uso de um projeto a seco que utilizava ar como dielétrico. Em 1882, foram desenvolvidos os primeiros estudos pelo professor Elihu Thompson, sobre a substituição do ar por OMI para a montagem de equipamentos menores e mais eficientes. Porém, foi apenas em 1892 que a empresa General Electric aplicou os estudos de Thompson, produzindo a primeira aplicação reconhecida de OMI em um transformador. Neste momento, a indústria passou a focar a atenção na determinação de óleos minerais com as propriedades ideais para a aplicação como dielétrico, sendo, por volta de 1899, a produção inicial de fluidos especialmente desenvolvidos para os transformadores (TULIO, 2008).

De 1892 para os dias de hoje, o transformador tornou-se um dos equipamentos elétricos mais importantes. Trata-se de máquina elétrica estática, constituída por um núcleo de aço silício, bobinas de fios de cobre revestidas de papel isolante, tanque, estrutura de montagem da parte ativa, além de outros componentes (FERNANDES P. O., 1988). A função básica deste equipamento é a transferência de energia elétrica de um circuito para outro, mantendo a frequência constante, porém variando os valores de corrente e tensão (DERVOS, PARASKEVAS, SKAFIDAS, & STEFANOU, 2005). Desta maneira, os transformadores são capazes de reduzir as perdas de energia, utilizando mecanismos de redução da corrente requerida na transmissão de uma determinada potência elétrica (BATISTA, 2005).

A parte principal de um transformador é o seu sistema de isolamento, constituído, basicamente, por um fluido isolante, comumente OMI, e uma isolação

sólida, a base de papel Kraft. Para a maioria dos casos, o papel isolante é o elemento responsável pela definição da vida útil do equipamento elétrico, uma vez que, diferente do isolante líquido, não pode ser regenerado ou substituído ao longo da operação do transformador (BATISTA, et al., 2005). Na FIGURA 1, está apresentado um esquema do núcleo de um transformador, sendo mostrado, em detalhe, o isolamento sólido.

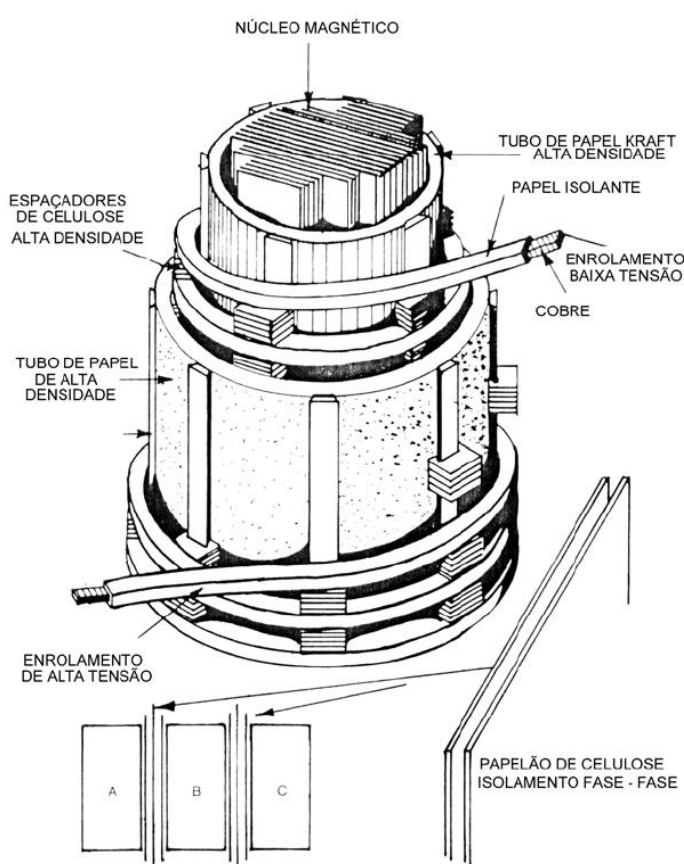


FIGURA 1 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DO NÚCLEO DE UM TRANSFORMADOR.
FONTE: (MYERS, KELLY, & PARRISH, 1982.)

Ao longo da vida útil dos transformadores, o sistema de isolamento fica sujeito a uma série de processos de desgaste e envelhecimento, devido às ocorrências de operação normal do equipamento (OKABE, KOHTOH, TSUCHIE, & AMIMOTO, 2009). Efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica, tais como pontos quentes, sobreaquecimentos, alta tensão e vibrações acabam resultando no aparecimento de significativas alterações tanto no papel isolante, como no OMI.

A fim de garantir a eficiência da máquina elétrica, evitando paradas

repentinas, devem ser desenvolvidos estudos e programas que visem o monitoramento das características do sistema, permitindo, assim, a implantação de programas de manutenção preventiva e preditiva (OKABE, KANEKO, KOHTOH, & AMIMOTO, 2009).

2.2 ISOLAMENTO LÍQUIDO – ÓLEO MINERAL ISOLANTE (OMI)

O OMI é um subproduto de petróleo, derivado do processo de produção da gasolina (GUEIBER, D.; LIMA, I.A.; OLIVEIRA, I.L.; ROMANO, C.A.; STADLER, C.C.; THOMAZ, M.S., 19__), que possui utilização irrestrita, desde medicinal à isolante térmico ou lubrificante, conforme detalhado na continuidade.

2.2.1 Caracterização do Óleo Mineral Isolante (OMI)

O OMI é uma mistura complexa de hidrocarbonetos de base parafínica, naftênica e aromática, obtido a partir do refino do petróleo a uma temperatura entre 300 e 400 °C, com ampla utilização comercial (GUEIBER, D.; LIMA, I.A.; OLIVEIRA, I.L.; ROMANO, C.A.; STADLER, C.C.; THOMAZ, M.S., 19__; FERNANDES P. , 1991). Mesmo tendo amplo emprego na indústria cosmética como produto umectante e na medicina para lubrificação (WHO, 1982), a sua principal utilização é como fluido isolante em equipamentos elétricos em transformadores, religadores e capacitores devido às características de boa condutividade térmica, alto ponto de fulgor, além da baixa toxicidade e biodegradabilidade (TIMOSHKIN, GIVEN, WILSON, & MACGREGOR, 2009; DU, ZAHN, LESIEUTRE, MAMISHEV, & LINDGREN, 1999).

De baixo custo para produção em larga escala, alta capacidade de regeneração e com boas características para manutenção (uma vez que possibilita um estudo das condições do equipamento por meio de análises físicas e químicas), o OMI é, atualmente, o fluido isolante mais utilizado na indústria de energia elétrica

(NUNES JR & DIOGO, 19_).

2.2.2 Propriedades físico-químicas

A função do OMI em um transformador é propiciar isolamento elétrico entre as diversas partes do circuito e permitir a transferência de calor (refrigeração) entre suas partes componentes (bobinas e do núcleo). Como isolante elétrico deve substituir o ar entre as partes ativas, preenchendo todos os espaços vazios e oferecer alta rigidez dielétrica e baixa condutividade (WYKROTA, 2004).

Bastante utilizado devido às suas propriedades dielétricas e refrigerantes, os OMIs de uso geral são produtos do refino do petróleo, em colunas de temperatura entre 300 e 400 °C. Apresentam-se como uma mistura complexa de hidrocarbonetos, contendo pequenas quantidades de nitrogênio, oxigênio e enxofre em sua composição (WYKROTA, 2004; JUNG & JUNG, 2008). De forma geral, suas moléculas médias possuem entre 19 e 23 átomos de carbono, arranjados em estruturas naftênicas e parafínicas, conforme a descrição:

- parafinas ou alcanos são hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta linear ou ramificada. Na FIGURA 2 está apresentado, de forma esquemática, um exemplo de cadeia parafínica.

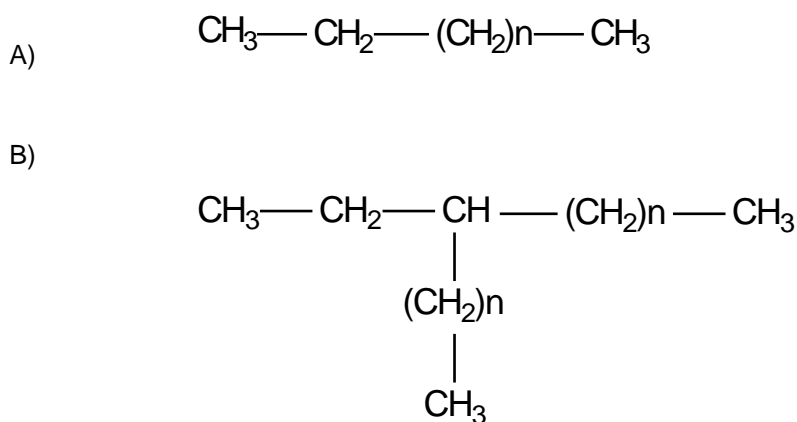


FIGURA 2 – EXEMPLOS DE CADEIAS PARAFÍNICAS (A) LINEAR E (B) RAMIFICADA).
FONTE: (LACTEC, 1991)

- naftenos ou cicloalcanos são hidrocarbonetos saturados de cadeia fechada contendo um ou mais anéis, os quais podem possuir uma ou mais cadeias laterais (lineares ou ramificadas). Na FIGURA 3, encontra-se mostrado, de forma esquemática, um exemplo de cadeia naftênica.

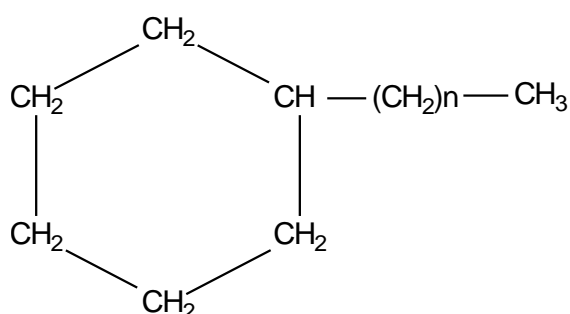


FIGURA 3 –EXEMPLO DE CADEIA NAFTÊNICA.
FONTE: (LACTEC, 1991)

Os hidrocarbonetos que constituem o OMI são pouco ativos quimicamente, o que se faz necessário para que o fluido não ataque os demais materiais do equipamento que entram em contato com o mesmo. Além disso, como os hidrocarbonetos saturados apresentam pouca resistência à degradação em presença de oxigênio e calor, uma parcela de hidrocarbonetos não saturados, da família dos aromáticos é, também, constituinte do óleo isolante, conferindo-lhe maior estabilidade (WYKROTA, 2004; LANDUCCI JR, 2009).

Estes hidrocarbonetos aromáticos, que entram na formulação do óleo mineral, apresentam-se na forma de anéis benzênicos combinados a anéis alifáticos, podendo ou não apresentar cadeias laterais (LACTEC, 1991). Na FIGURA 4, está apresentada, de forma esquemática, a estrutura base destes compostos.

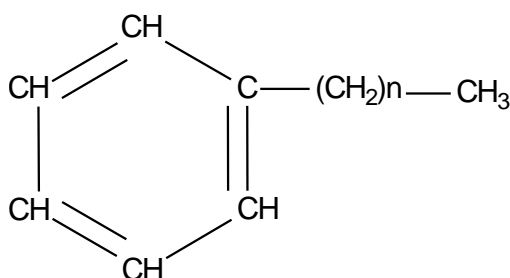


FIGURA 4 –ESTRUTURA BASE DOS HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS.
FONTE: (LACTEC, 1991)

Dentre os demais compostos orgânicos importantes, o óleo mineral possui, também, parcelas de enxofre termicamente estáveis, que são inibidores naturais do processo de oxidação, e, conseqüentemente, do envelhecimento (FERNANDES P. , 1991).

A combinação de todos estes fatores leva à produção de um fluido isolante com características ideais para a utilização na rede de distribuição de energia. Na TABELA 1 encontram-se detalhados os parâmetros típicos do OMI que o caracterizam como um fluido de alta resistividade volumétrica; rigidez dielétrica e compatibilidade; baixa viscosidade cinemática e perda dielétrica; além de estabilidade regular e baixo ponto de fulgor, porém ideal para o uso desejado (BRASIL, 2008; MILASH, 1984).

De porte de todas estas características, acrescentado do baixo custo de produção, o OMI de uso geral vem sendo utilizado a mais de 100 anos, estando presente, atualmente, em 95% dos equipamentos em rede de distribuição nacional (GUEIBER, D.; LIMA, I.A.; OLIVEIRA, I.L.; ROMANO, C.A.; STADLER, C.C.; THOMAZ, M.S., 19__; NUNES JR & DIOGO, 19_).

TABELA 1 –CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO OMI NOVO

Propriedades	Valor Médio Típico
Viscosidade cinemática (a 20 °C)	25,0 cSt
Ponto de fulgor	140 °C
Índice de Neutralização (máx)	0,03 mg KOH.g ⁻¹
Fator de Potência (a 25 °C)	0,05%
Fator de Potência (a 90 °C)	0,40%
Rigidez Dielétrica (Eletrodo de Disco)	30 kV
Rigidez Dielétrica (Eletrodo de Calota)	42 kV
Tensão Interfacial (a 25 °C)	40 dina.cm ⁻¹

FONTE: (BRASIL, 2008)

2.2.3 Coleta de Amostras de Óleo Mineral Isolante em Equipamentos Energizados

Parte fundamental da manutenção preventiva e preditiva de máquinas elétricas, a amostragem de OMI e posterior análise das suas características têm por

objetivo verificar se as suas propriedades podem vir a inferir na vida útil dos equipamentos (WEG Equipamentos Elétricos S.A.; ZHANG & MACALPINE, 2006).

A amostragem do OMI de transformadores, diferente do papel isolante, pode ser realizada durante a operação do mesmo, desde que sejam tomados os devidos cuidados de modo a garantir a coleta segura e correta. A norma NBR 8840/1992 contempla as condições de análise de equipamentos elétricos em um guia completo de amostragem de líquidos isolantes (ABNT, 1992).

2.3 ISOLAMENTO SÓLIDO

O isolamento sólido de um transformador é comumente constituído por papel isolante do tipo Kraft e é o principal responsável pelo funcionamento adequado de um equipamento elétrico, uma vez que não é passível de regeneração. Atualmente, existem alguns tipos diferentes de papel isolante disponíveis no mercado, sendo mais utilizadas as versões convencional e termoestabilizada (STORELLI, 20_).

2.3.1 Características e Tipos de Papel

O papel mais utilizado em transformadores é proveniente de madeira e produzido usualmente pelo processo Kraft. Este material é constituído, principalmente, por celulose e hemicelulose (90%), possuindo também em sua estrutura a lignina (7 a 8%) e pentosanas em quantidades residuais (BATISTA, PATRIARCA, TRINDADE, & WILHELM, 2007).

A qualidade deste papel para uso em transformadores pode ser verificada com a realização do ensaio de Grau de Polimerização (GP), parâmetro que exprime o número médio de anéis de glucose que constituem a molécula polimérica da celulose (BASSETO FILHO, MACNUTT, & GRIFFIN, 1993). Para papéis novos, o valor inicial do GP é de cerca de 1200, sendo reduzido para aproximadamente 900 ainda antes de entrar em funcionamento junto do equipamento elétrico, devido aos

processos preliminares de secagem do material (MARTINS M. A., 2007; SÁ & NEPOMUCENO, 1997).

Denomina-se papel termoestabilizado o material a base de celulose produzido a partir do papel Kraft convencional, modificado quimicamente de modo a reduzir a velocidade de degradação deste devido à ação da temperatura. Foi, reconhecido pela NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) como possível substituto do papel Kraft convencional no isolamento de cobre dos transformadores elétricos, sendo estabelecido o valor de 65 °C como um novo limite de elevação de temperatura do enrolamento, em vez dos 55 °C usados no caso do papel convencional. Estes 10 °C adicionais permitiram ao fabricante aumentar a carga do transformador em até 12% (MARTINS M. A., 2007).

2.3.2 Metodologias de Análise Química

Uma vez que não é possível a coleta de papel para ensaio de equipamentos em operação, utiliza-se a análise da presença de compostos furânicos (CF) em OMI como método indireto de verificação do estado de degradação do isolamento sólido. Estes ensaios têm sido desenvolvidos por métodos envolvendo Cromatografia Líquida de Alta Pressão e Alta Resolução (HPLC) ou por meio de metodologias colorimétricas, de acordo com a norma ABNT NBR 15349 (ABNT, 2006). Os compostos presentes em maior concentração no OMI devido à degradação do papel são o 2-Furfuraldeído (2-FAL) e o 5-Hidroximetil-2-Furfuraldeído (5-HMF) (MARTINS M. A., 2007), porém as técnicas utilizadas permitem ainda a detecção de outros três compostos adicionais, menos importantes (BASSETO FILHO, MACNUTT, & GRIFFIN, 1993).

A verificação exata da qualidade do papel pode ser realizada apenas com o desenvolvimento de ensaios no próprio material, como é o caso do ensaio de GP, que verifica a sua degradação por meio da quantificação das cadeias celulósicas, de acordo com a norma ABNT 60450 (ABNT, 2009). Isso acontece, pois, além de não haver uma correlação exata entre os valores de CF presentes no óleo e o estado de

degradação do papel, muitas vezes há a regeneração do OMI do transformador. Nestes casos, se não existe um registro do histórico de operação, recuperação e ensaios do equipamento elétrico, a utilização de um óleo regenerado tende a mascarar o real estado do papel, influenciando na manutenção preventiva de forma negativa. Apesar disso, ensaios na isolação sólida podem ser realizados apenas com a parada da máquina, sendo utilizados principalmente para verificação de motivos de uma falha, e não como monitoramento periódico das condições de operação do equipamento (ZIRBES, ROLIM, & ZÜRN, 2005).

2.4 DEGRADAÇÃO DO MATERIAL ISOLANTE

Ao longo de vida útil de um transformador, seus materiais, especialmente os constituintes do sistema de isolamento, são submetidos a uma série de condições de elevadas temperaturas, umidade indesejável, exposição ao oxigênio, etc. Esta degradação decorrente de má operação ou tempo de utilização levam ao desgaste tanto o papel como o OMI, resultando no comprometimento das características necessárias para garantir o isolamento ideal do equipamento. Uma vez que o OMI pode ser regenerado, inclusive para máquinas em operação, a degradação do papel isolante é o fator fundamental na determinação do tempo remanescente de funcionamento de um transformador (TULIO, 2008; MAK, BASSETO FILHO, & AITA, 1995).

2.4.1 Degradação do Óleo Mineral Isolante

A presença de oxigênio, operação sob condições de alta temperatura e o contato com os enrolamentos de cobre aceleram os processos de degradação do OMI. Isto provoca a deterioração das propriedades isolantes do material, acelera o processo de degradação da celulose e culmina com a formação de uma borra de matriz polimérica, que se acumula nas partes ativas do equipamento, dificultando as

trocas de calor (TULIO, 2008; OLIVEIRA, QUEIROZ, SARAIVA, & MOURA, 2005).

Sendo a base do OMI os hidrocarbonetos de cadeia longa, o seu envelhecimento provoca a quebra destas moléculas orgânicas em substâncias de menor peso, por intermédio de mecanismos cíclicos de peroxidação. Nestes, a degradação fotoquímica promove a formação de radicais peróxidos, hidroperóxidos e água a uma velocidade exponencial (LIPSTEIN & SHAKNOVICH, 1970), com a diminuição da sua tensão interfacial, indicando uma possível necessidade de regeneração ou substituição (FROTA, 1985).

Produtos secundários destas reações em cadeia, a partir dos radicais peróxidos e hidroperóxidos são formados no OMI diversos alcoóis, aldeídos e cetonas (além de mais uma quantidade de água). Nesta etapa, uma entrada indesejada de oxigênio (devido às dificuldades de vedação ou rompimento da borracha), produzirá ácidos carboxílicos, que poderão atacar os demais componentes internos do equipamento (como o papel) e influenciarão no índice de neutralização do isolante líquido (MAK, BASSETO FILHO, & AITA, 1995).

Finalmente, a presença de diversos compostos de baixa massa molecular, sob a influência da temperatura, promove as reações de polimerização, formando um composto mais pesado que o OMI. Este, se depositará na parte ativa da máquina, sob a forma de borra, dificultando as trocas de calor, intensificando a degradação do isolamento sólido devido ao seu caráter ácido (LIPSTEIN & SHAKNOVICH, 1970).

De modo a estender a vida útil do OMI, foi estudado o comportamento de diversos compostos, com o objetivo de encontrar uma substância que atuasse como inibidor de oxidação, sem que as características do isolante líquido fossem alteradas. Neste sentido está o DBPC (2,6-di-terc butil para cresol), um material fenólico que atua na etapa de formação de radicais livres e peróxidos, retardando a ação do envelhecimento até que o composto seja consumido por completo (LIPSTEIN & SHAKNOVICH, 1970; OLIVEIRA, QUEIROZ, SARAIVA, & MOURA, 2005).

O DBPC é, atualmente, o inibidor mais utilizado em OMI comerciais, sendo permitido pela ANP o uso deste em uma quantidade máxima de 0,030% (BRASIL,

2008).

2.4.2 Degradação do Papel Isolante

A degradação química do papel isolante é uma das causas mais comuns que origina defeitos graves em transformadores elétricos, devido à redução do GP da celulose e devido à destruição das ligações interfibras do isolamento sólido. Estes processos, que envolvem a cisão das cadeias poliméricas, provocam a diminuição da resistência mecânica do papel, além de produzir uma série de substâncias, como gases (hidrogênio, metano, etileno, monóxido e dióxido de carbono, etc.), água e CF, em especial o 2-FAL e o 5-HMF (MARTINS M. A., 2007).

Como comentado anteriormente, o valor inicial do GP do papel Kraft é de cerca de 1200 cadeias, sendo reduzido para 900 antes mesmo de entrar em operação devido à secagem do material para colocação no equipamento (SÁ & NEPOMUCENO, 1997). Com o tempo de utilização, este GP tende a decrescer continuamente, mantendo a resistência mecânica praticamente inalterada para decaimentos até cerca de 500. Valores de GP entre 500 e 200 já apresentam significativa degradação das características do material, sendo a resistência mecânica reduzida de 50 a 80% em relação à inicial. Para um GP abaixo de 200, o material torna-se friável, sem qualquer condição de resistência mecânica, chegando a desagregar-se em pequenos fragmentos e a formar uma borra característica deste estado de degradação (MARTINS M. A., 2007; ZIRBES, ROLIM, & ZÜRN, 2005).

A influência dos fatores temperatura, oxigenação e umidade para a degradação do isolamento sólido e consequente determinação da vida útil do transformador foi apresentada no estudo de MARTINS, 2007. Em laboratório, foram desenvolvidos três sistemas de simulação das condições de um transformador, considerando a temperatura de operação de 90 °C: (a) envelhecimento do papel sob condições ideais de umidade e oxigênio (papel seco e ausência completa de O₂); (b) envelhecimento real com papel seco (presença de concentrações normais de O₂); e (c) envelhecimento real com papel a 2% de umidade (e presença de O₂ em

concentrações normais). Considerando a expectativa de vida de um transformador sob condições ideais de envelhecimento, de 50 anos, foram simuladas as demais condições e verificada a variação do GP ao longo dos anos de operação, partindo de um valor inicial de 1000 e interrompendo o estudo em um valor de 200. Na FIGURA 5 estão apresentados os resultados do estudo desenvolvido.

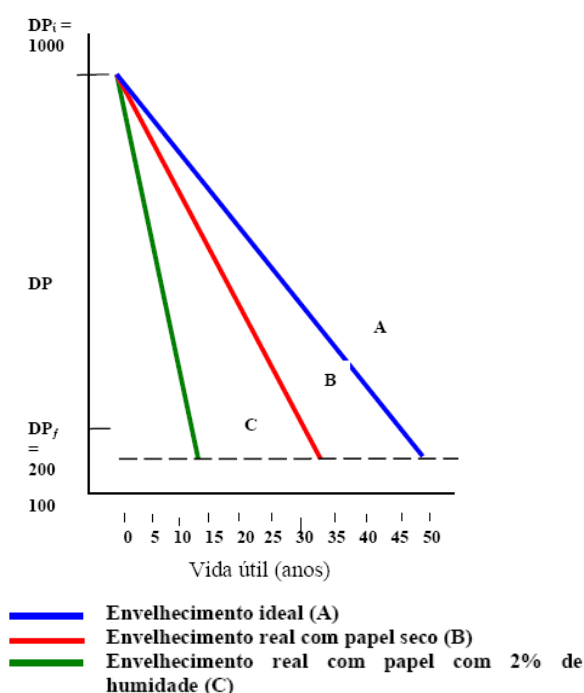


FIGURA 5 – RESULTADOS DO ESTUDO DESENVOLVIDO POR MARTINS, 2007, PARA A VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA, OXIGÊNIO E UMIDADE NA DEGRADAÇÃO DO ISOLAMENTO SÓLIDO DE UM TRANSFORMADOR.

FONTE: (MARTINS M. A., 2007).

Conforme demonstrado na FIGURA 5, a deterioração no isolamento sólido causada pela combinação dos fatores umidade, oxigênio e temperatura, provocou, para as condições de papel isolante inicialmente seco, um decaimento de 15 anos na expectativa de vida do equipamento, passando de 50 para 35 anos. Para os transformadores em condições reais, com o papel úmido a 2% no início da operação, o decaimento no tempo de vida verificado foi de 35 anos, passando de 50 para 15 anos (MARTINS M. A., 2007).

2.4.3 Compostos Furânicos

Constituinte principal do papel isolante, a celulose é um polímero formado por longas cadeias de anéis de glucose, conectadas umas às outras por ligações glicosídicas. A presença de oxigênio e umidade, além da operação sob condições de altas temperaturas, promove a degradação deste material, com a quebra das ligações glicosídicas, abertura dos anéis e consequente diminuição do GP. Essa degradação química (pirolítica, hidrolítica ou oxidativa) produz, entre outras substâncias, CF (FIGURA 6), em especial o 2-FAL, produto mais estável e solúvel no óleo (MARTINS M. A., 2007).

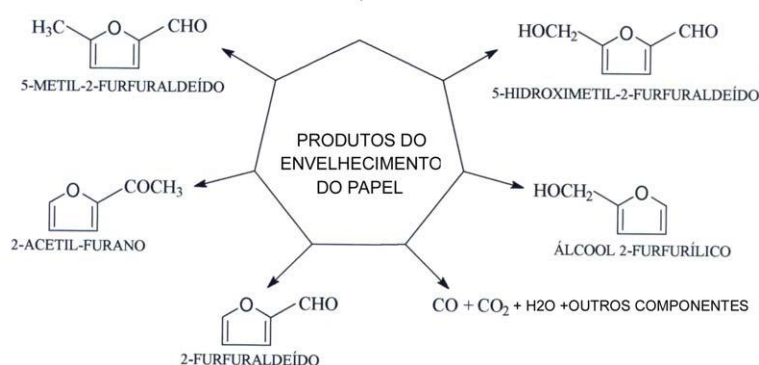
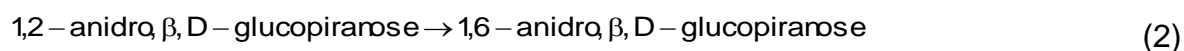
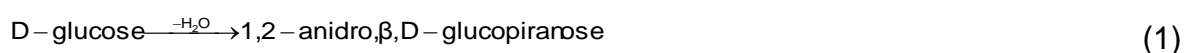
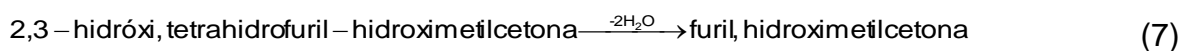
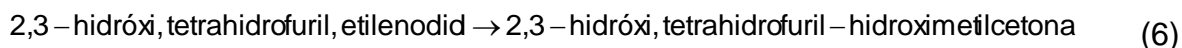


FIGURA 6 – ESTRUTURA MOLECULAR DOS COMPOSTOS FURÂNICOS.
 FONTE: (PAHLAVANPOUR & PABLO, 1997)

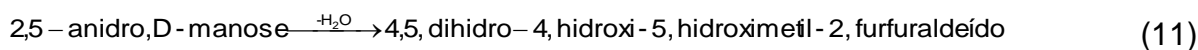
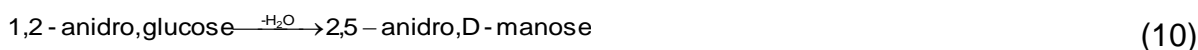
A degradação da glucose por pirólise, de uma maneira geral, requer a perda de três moléculas de água e uma de formaldeído (ou, como alternativa a esta, uma molécula de monóxido de carbono e outra de hidrogênio). É bastante influenciada por fatores físicos, como temperatura, atmosfera local, cristalinidade da celulose e presença de metais ou outras impurezas (MARTINS M. A., 2007; BASSETO FILHO, MACNUTT, & GRIFFIN, 1993). Esquemáticamente, a degradação da celulose pode ser sintetizada pelas reações químicas apresentadas entre as Equações (1) a (8).

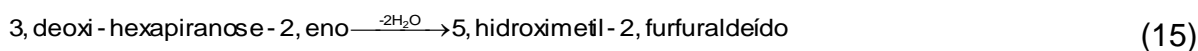
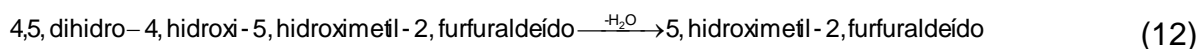




Outros quatro CF, 5-metil-2-furfuraldeído (5-MEF), 2-acetilfurano (2-ACF), 5-HMF e o álcool furfurílico (2-FOL), podem ser formados, principalmente, pela degradação oxidativa do papel. Esta oxidação é catalisada por radicais, tipo hidroxila, produzidos devido à decomposição do peróxido de hidrogênio, o qual é formado pela reação com o oxigênio dissolvido em água, que entra no equipamento a partir de falhas de vedação dos elastômeros que unem as diferentes partes do transformador (BASSETO FILHO, MACNUTT, & GRIFFIN, 1993; LEWAND, 2006). Outras substâncias que também agem como catalisadores desta reação são os cátions metálicos, como Cu^+ e Cu^{2+} ou Fe^{2+} ou Fe^{3+} , constantes no enrolamento do transformador (MARTINS M. A., 2007).

A presença de umidade no interior de um equipamento também promove a degradação do isolamento sólido, uma vez que aumenta a concentração de prótons H^+ . Tal reação promove a dissociação de ácidos carboxílicos e a consequente hidrólise ácida de ligações internas da molécula polimérica. Esta hidrólise é seguida de uma série de outras reações de desidratação catalisadas pela presença de ácido, sendo liberadas cerca de três moléculas de água, para cada unidade de glucose rompida (VASCONCELOS, ALVES, & MOURA, 2008). Existem dois mecanismos de degradação do isolamento sólido por hidrólise, os quais são apresentados, esquematicamente, entre as Equações (9) e (13), via epóxido, e nas Equações (14) a (16), via enol (MARTINS M. A., 2007).





Em campo, de acordo com o estudo realizado por DIOGO, 1997, algumas constatações interessantes puderam ser obtidas pela simples análise estatística dos dados de CF para os transformadores de uma determinada concessionária de energia elétrica. Foi verificada uma tendência de envelhecimento mais acentuado para os transformadores com ciclo de carregamento alto (elevadores), em relação aos inter ligadores/ abaixadores e os reatores de derivação. Além disso, verificou-se também uma variação na concentração de CF furânicos em óleo, da ordem de 90% (aproximadamente), para equipamentos devidamente selados.

Segundo o mesmo estudo (DIOGO, 1997), a formação de CF no óleo pode ser analisada sob dois tipos de envelhecimento distintos, os quais:

- envelhecimento prematuro. Para os equipamentos que possuem idade cronológica até 20% superior àquela esperada pela análise da concentração de CF em OMI; e, em
- final de vida. Neste caso, os equipamentos já se encontram sob operação a mais de 20 anos e cuja concentração de CF vem sendo monitorada com periodicidade anual ou semestral. Nestes casos, a isolação sólida já está, comumente, comprometida e o perfil do teor de CF apresenta crescimentos desproporcionais, com elevações abruptas da concentração.

Identificado o estado de envelhecimento do equipamento por meio da análise de CF, torna-se necessário, muitas vezes, uma intervenção de modo a coletar amostras de papel isolante para a verificação de seu GP. Deve-se, ainda, estudar os motivos possíveis que o levaram a esta situação, com a avaliação criteriosa do carregamento histórico, máximas temperaturas, tratamentos e reparos anteriores, características do óleo, etc. Neste sentido, o diagnóstico completo tem

caráter confirmatório em relação ao estudo da concentração de CF em OMI na averiguação da vida útil remanescente do transformador (DIOGO, 1997).

2.4.4 Correlação entre o aparecimento de 2-FAL e o decaimento do grau de polimerização

A concentração de CF no OMI é dependente de uma série de fatores, tais como a temperatura de operação do equipamento; o tipo de papel empregado no isolamento sólido (Kraft, Nomex, termoestabilizados); o tipo de OMI (inibido, com DBPC; ou não inibido); o grau de envelhecimento do óleo, verificado, principalmente, pelo índice de acidez; razão entre os volumes de isolamento sólido/líquido, que é dependente do tipo de transformador sob estudo; o teor de umidade no óleo e no papel; e o teor de oxigênio dentro do equipamento (MARTINS M. A., 2007). Com base nestas informações, ao longo dos últimos anos, uma série de pesquisadores tem buscado o estabelecimento de uma relação matemática absoluta que seja capaz de relacionar o aparecimento de 2-FAL no isolamento líquido e o GP do isolamento sólido, de modo a prever o tempo de vida de determinado equipamento sem que seja necessária a remoção deste de sua operação.

A partir da década de 80, diversos estudos objetivaram uma comparação entre o valor do GP do isolamento sólido e os resultados das análises de CF em óleo, de modo a estabelecer um coeficiente de correlação entre ambos. Dentre os trabalhos mais importantes estão os desenvolvidos pelos pesquisadores DePablo, Burton, Vuarchex e Chendong. Nas Equações (17) a (20) estão apresentadas as relações matemáticas desenvolvidas pelos pesquisadores e, na FIGURA 7, as curvas logarítmicas de correlação para cada um dos estudos (LÜTKE, HÖHLEIN, & KACHLER, 2002).

DePablo

$$GP.([2-FAL] + 2,3) = 1850 \quad (17)$$

Burton

$$\text{Log [2-FAL]} = 2,5 - 0,005.GP \quad (18)$$

Vuarchex

$$\text{Log [2-FAL]} = 2,5 - 0,0049.GP \quad (19)$$

Chendong

$$\text{Log [2-FAL]} = 1,5 - 0,0035.GP \quad (20)$$

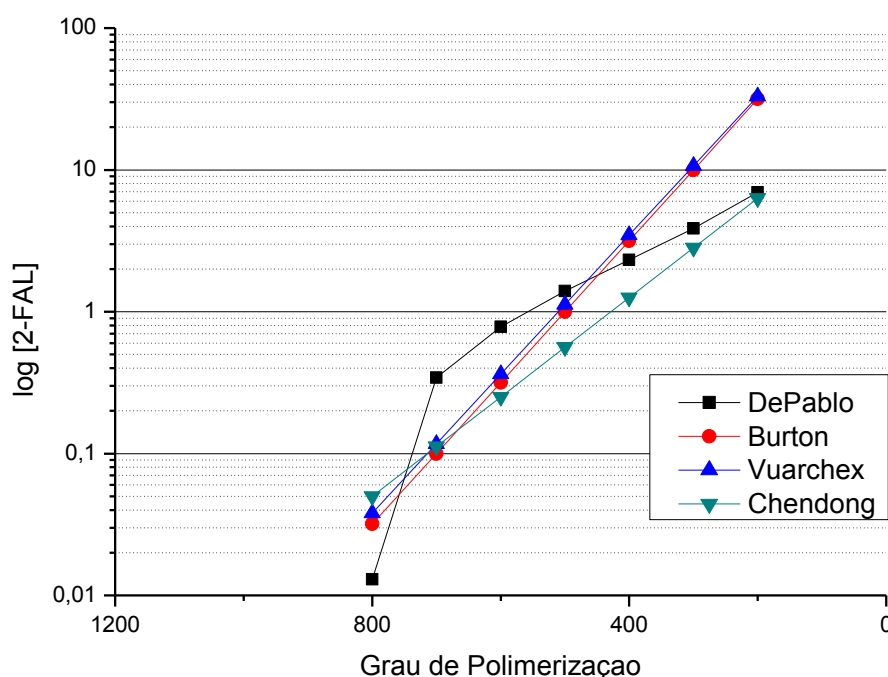


FIGURA 7 – CURVA LOGARÍTMICA DE CORRELAÇÃO ENTRE GP E CONCENTRAÇÃO DE 2-FAL

FONTE: O autor (2010).

Estudos subseqüentes, porém, comprovaram que a complexidade do sistema impede o estabelecimento de uma relação global entre ambos os parâmetros, uma vez que a concentração do 2-FAL, efetivamente presente no óleo para cada estado de envelhecimento do isolamento sólido, é dependente de uma série de parâmetros, os quais (MARTINS M. A., 2007):

- a velocidade de formação de 2-FAL. Este parâmetro é dependente de fatores como o projeto do transformador; materiais utilizados em sua construção (tipo de papel e de óleo mineral); histórico do equipamento (possível recuperação ou troca do isolamento líquido ou limpeza interna) e das condições de operação do mesmo;

- a velocidade de degradação do 2-FAL no OMI. Este parâmetro é dependente da temperatura de operação do equipamento;
- o perfil de distribuição do 2-FAL entre o papel e o óleo mineral. Para cada valor de 2-FAL, não existe um valor exato de GP correspondente, mas de distribuições longitudinais, axiais e radiais de valores de GP entre as zonas superior e inferior do enrolamento. E, novamente, estas distribuições de valores são função dos perfis de temperatura, umidade e oxigênio dissolvido do interior do transformador.

Um estudo estatístico desenvolvido na Europa (MARTINS M. A., 2007), abrangeu 5005 transformadores espalhados por 4 países de Europa, constatando-se uma série de padrões de referência, como por exemplo:

- o aumento da idade do transformador significou um aumento da quantidade de equipamentos com maior concentração de 2-FAL, principalmente, para aqueles em que não fora constatada qualquer substituição ou regeneração do isolamento líquido;
- os transformadores de baixa tensão e/ou baixa potência foram os que apresentaram maior concentração de 2-FAL no OMI;
- a produção de 2-FAL foi mais efetiva em transformadores com isolamento líquido não inibido ou de maior polaridade, para as mesmas condições experimentais.

Apesar da alta estabilidade do composto 2-FAL em OMI, consequente da degradação do isolamento sólido, vem sendo sugerida na literatura uma análise mais complexa destes CF (ABU-ELANIEN & SALAMA, 2009; LÜTKE, HÖHLEIN, & KACHLER, 2002), com ênfase especial para o álcool 2-furfurílico (2-FOL) (MARTINS M. A., 2007). Neste estudo, por exemplo, foi apresentada uma comparação da degradação térmica do papel termoestabilizado e convencional, ambos do tipo Kraft. Pelas análises do GP, 2-FOL e 2-FAL, para as amostras de papel termoestabilizado envelhecidas ao longo de 24 h, sob diferentes temperaturas (de 90 °C a 240 °C), foi identificado o 2-FOL como o composto de maior concentração no fluido. Já, para as amostras de papel convencional, o 2-FAL continuou se mostrando o indicador ideal na realização deste tipo de manutenção preventiva. Verificou-se, porém, a

necessidade de um estudo mais longo da evolução da concentração do 2-FOL em amostras envelhecidas, tanto em campo como em laboratório, para a certificação da metodologia de análise.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação da presença de indicadores de oxidação do papel isolante Kraft convencional e termoestabilizado consistiu, inicialmente, do envelhecimento térmico dos materiais, de modo a verificar o seu comportamento quando sujeitos a condições de altas temperaturas, como ocorre em equipamentos elétricos. Durante esta etapa, amostras de óleo e papel isolante foram envelhecidas a 100 e 125°C, por um período de 240 dias. Retiradas das estufas, os materiais foram analisados quanto às características físico-químicas do isolamento líquido, além do GP do papel e dos CF liberados no óleo. Uma análise conjunta de todos os dados obtidos permitiu, então, o desenvolvimento de uma metodologia de estudo para a manutenção preventiva e preditiva de máquinas elétricas.

Objetivou-se, então, a validação do trabalho desenvolvido em laboratório, com a coleta e subsequente análise de amostras retiradas de transformadores das subestações da concessionária. Devido à dificuldade na amostragem de papel de máquinas em operação, foram coletadas apenas amostras de OMI, as quais foram analisadas de forma similar às amostras envelhecidas em laboratório.

3.1 ESTUDO LABORATORIAL DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DE ÓLEO MINERAL E PAPEL ISOLANTE

3.1.1 Caracterização do Isolamento Líquido – Óleo Mineral Isolante

Para o desenvolvimento da etapa experimental do trabalho, foi utilizado o OMI PETROBRAS AV-60-IN, código 01.008.984, lote 75101/00264. O OMI tipo A (de base naftênica predominante) é um material largamente utilizado em equipamentos de transmissão e geração de energia.

De modo a verificar as características do líquido isolante sob estudo, antes do início das atividades experimentais, foram realizados os ensaios de

caracterização do material, conforme previsto pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Regulamento Técnico ANP nº 4 de 2008 (BRASIL, 2008).

3.1.2 Caracterização do Isolamento Sólido

Como matéria prima principal no desenvolvimento da etapa experimental do trabalho foi utilizado o papel Kraft isolante da marca comercial Munksjö, conforme a seguinte especificação:

- papel Kraft termoestabilizado de espessura 0,075 mm;
- papel Kraft convencional de espessura 0,1 mm.

Previamente à realização do envelhecimento térmico, as amostras de papel Kraft termoestabilizado e convencional foram secas em estufa a 100 °C/ 2 horas, sob vácuo, sendo verificada a umidade antes e após o procedimento.

Após a secagem e verificação da umidade remanescente, foi realizada a caracterização destes materiais por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) (SAMISTRADO, MUNIZ, de PERALTA-ZAMORA, & CORDEIRO, 2009) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (QUADROS, 2006).

3.1.2.1 Análise de Umidade por Infravermelho

Antes e após a secagem do material, as amostras de papel Kraft convencional e termoestabilizado foram analisadas quanto à presença de umidade. O ensaio foi realizado em equipamento Gehaka IV 2002 - Analisador de Umidade por Infravermelho, sendo as amostras sujeitas a 100 °C/ 2 minutos antes da medição (conforme procedimento interno do laboratório).

3.1.2.2 Espectroscopia na Região de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise do papel por FTIR foi realizada em acordo com a norma ASTM E 1252 (ASTM, 2002), com o equipamento Espectrofotômetro de Infravermelho Bomem – Hartmann & Braum, modelo MB Series 100, com resolução de 4 cm^{-1} . O espectro foi obtido com a sequência de 16 varreduras, na faixa de $5000\text{ a }650\text{ cm}^{-1}$.

As amostras foram analisadas através da técnica de refletância, em acessório de ATR horizontal, marca Graseby Specac, em cristal de ZnSe retangular, $10\times 50\text{ mm}$. Foram dispostas diretamente no acessório especial, sendo aplicada pressão para melhor contato entre a superfície do cristal e o papel.

Após aquisição dos resultados, foi realizada a correlação com os espectros de referência encontrados no banco de dados do equipamento, através do uso de software específico, e de biblioteca de espectros Sadtler. Também foi realizada pesquisa de grupos funcionais através do uso de catálogos digitais e de guias impressos.

3.1.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a caracterização do material pela técnica de MEV, as amostras foram recobertas com ouro em um metalizador Sputter Coater SCD 005 e foi utilizado um microscópio Philips XL 30 com fonte de elétrons de filamento de tungstênio e microsonda com análise de energia dispersiva acoplada (EDS).

3.1.3 Envelhecimento do Sistema Óleo/ Papel

Seguindo algumas linhas de pesquisa estudadas em trabalhos semelhantes (BATISTA, 2005; TULIO, 2008), optou-se por desenvolver um envelhecimento acelerado do sistema óleo/ papel de modo a estudar as características de cada uma

das matérias primas sujeitas à degradação.

Para isto, os materiais constituintes das amostras foram acondicionados dentro de frascos de vidro de 250 mL, com a utilização dos seguintes materiais em suas devidas quantidades e preparação: i) como recipiente das amostras foram utilizados frascos de vidro de 250 mL, do tipo frasco para DBO (com tampa de vidro esmerilhada – FIGURA 8), da marca comercial Corning. Os frascos e as tampas foram identificados e secos em estufa, a 100 °C/1 h, antes da preparação das amostras; ii) para o OMI foi utilizado um volume de 210 mL de óleo novo em cada uma das 111 amostras sob estudo. De modo a remover parte do oxigênio presente na matéria prima, depois de acondicionado nos devidos frascos, o óleo passou por um sistema de borbulhamento com gás N₂ durante o período de 10 minutos (FIGURA 9). Após o borbulhamento, os frascos foram fechados com as tampas esmerilhadas e as amostras armazenadas sob abrigo da luz natural; iii) foram preparadas 51 amostras de óleo/ papel Kraft termoestabilizado e 51 amostras de óleo/ papel Kraft convencional, sendo o papel disponibilizado em tiras de 2 cm de largura. Para cada uma das amostras foram utilizadas tiras de 4 m de comprimento, previamente enroladas para a sua inserção no interior do frasco. Os papéis convencional e termoestabilizado foram adquiridos no mercado, porém, não foi possível obtê-los de mesma espessura devido a diferenças de fabricação do material. Como o mecanismo de degradação do papel se dá de forma mais superficial do que volumétrica (BASSETO FILHO, MACNUTT, & GRIFFIN, 1993), foi adotada a equivalência de área superficial para o envelhecimento em questão; iv) como padrão de referência, foram então preparadas 9 amostras contendo massa de papel convencional equivalente à utilizada no papel termoestabilizado; e, v) foram preparadas 111 placas de cobre de 1 cm de largura e 2 cm de comprimento, como catalisador do envelhecimento térmico. Estas foram previamente lixadas com lixas com granulometria de 150 e de 400, e limpas com carbureto de silício e acetona, de modo a remover eventuais impurezas da superfície.



FIGURA 8 – FRASCOS DE VIDRO DE 250 ML, DO TIPO DBO (MARCA COMERCIAL CORNING), COM TAMPA ESMERILHADA, UTILIZADOS PARA O ENVELHECIMENTO DAS AMOSTRAS.

FONTE: O autor (2010).



FIGURA 9 – BORBULHAMENTO DE GÁS NITROGÊNIO NOS SISTEMAS ÓLEO/ PAPEL ANTES DO INÍCIO DO ENVELHECIMENTO.

FONTE: O autor (2010).

Após a preparação das amostras, estas foram divididas em 4 grupos, conforme:

- três amostras de branco, sujeitas a um envelhecimento à temperatura ambiente e abrigadas da luz durante 63 dias. Tratam-se de amostras de papel termoestabilizado, papel convencional e, também, de papel convencional como equivalente de massa do papel termoestabilizado, com a finalidade de verificar a degradação dos materiais em ausência de estresse térmico (FIGURA 10);
- 108 amostras, sujeitas ao envelhecimento em estufa a 100 e 125 °C, respectivamente, durante até 240 dias. Trataram-se de 50 amostras de papel termoestabilizado, 50 de papel convencional e 8 de papel

convencional como equivalente de massa do papel termoestabilizado (FIGURA 11).



FIGURA 10 – AMOSTRAS DE BRANCO, SUJEITAS A UM ENVELHECIMENTO NA TEMPERATURA AMBIENTE E ABRIGADAS DA LUZ DURANTE 63 DIAS.
FONTE: O autor (2010).



FIGURA 11 – DISPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS NO INTERIOR DAS ESTUFAS DE ENVELHECIMENTO TÉRMICO.
FONTE: O autor (2010).

Todo este processo de envelhecimento foi baseado na literatura pesquisada (BATISTA, 2005; TULIO, 2008) e teve como objetivo básico simular algumas das condições encontradas no transformador e acelerar o mecanismo de degradação do papel para ser diagnosticado pelas técnicas de análise propostas.

3.1.4 Análise do Envelhecimento do Óleo/Papel

O envelhecimento acelerado dos sistemas óleo/ papel foi preparado para ser desenvolvido ao longo de 240 dias, sendo retiradas periodicamente amostras de isolamento convencional e termoestabilizado, submetidas às temperaturas de 100 e

125 °C.

Após o envelhecimento acelerado, as amostras de óleo foram devidamente armazenadas em frascos fechados de vidro âmbar de 250 mL, previamente identificados com o tipo de papel utilizado (termoestabilizado ou convencional), a temperatura da estufa e o tempo de envelhecimento, conforme apresentado na FIGURA 12. Estas amostras foram analisadas quanto à degradação do fluido isolante, bem como quanto à presença de CF dissolvidos em óleo, formados em função da degradação do isolamento sólido.



FIGURA 12 – SEPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE ÓLEO E PAPEL E ADEQUADA IDENTIFICAÇÃO.

FONTE: O AUTOR (2010).

As amostras de papel, assim que retiradas das estufas de envelhecimento, tiveram o óleo impregnado extraído em acordo com as indicações da norma ABNT NBR IEC 60450:2009 (ABNT, 2009). Após a extração, o papel foi armazenado em sacos plásticos pequenos, devidamente identificados. O isolamento sólido foi analisado quanto à degradação ao longo do tempo de envelhecimento, conforme as metodologias descritas na sequência.

3.2 AMOSTRAGEM DE ÓLEO MINERAL ISOLANTE DO BANCO DE EQUIPAMENTOS DA CONCESSIONÁRIA

De modo a obter alta confiabilidade nas amostras a serem coletadas, foi estabelecido um plano de amostragem em acordo com a norma ABNT NBR 8840/1992 (ABNT, 1992).

3.2.1 Máquinas Amostradas

Foram selecionados transformadores semelhantes (ou seja, que operavam em condições similares de temperatura e tensão) para coleta de todas as amostras de óleo. Este procedimento teve por objetivo a otimização da comparação dos dados obtidos, tanto entre um equipamento e outro, quanto com o desenvolvido em laboratório.

De modo a obter, também, o máximo de informações sobre os equipamentos em questão, solicitou-se a opção de amostragem de transformadores cujos dados estivessem melhor documentados. O histórico de operação de cada uma das máquinas amostradas (trocas ou regeneração de óleo, tipo de isolamento sólido, análises realizadas, etc.) permitiu, também, o desenvolvimento de um trabalho mais aprofundado e a obtenção de conclusões mais completas sobre cada amostra em estudo.

3.2.2 Condições de Volume e Acondicionamento

De modo a permitir a realização de todos os ensaios necessários, bem como o armazenamento de amostras de contra prova, foi coletado 1 L de OMI por ponto de amostragem. Estas foram armazenadas em frascos adequados (tipo Âmbar) e mantidas em abrigo de luz e calor para a preservação das características do fluido.

3.2.3 Identificação das Amostras

As amostras coletadas foram encaminhadas ao laboratório juntamente com as informações sobre o histórico do transformador, identificadas com as seguintes informações:

- Número de série do transformador

- Marca/modelo
- Ano de fabricação
- Potência
- Classe de tensão
- Tipo de isolamento líquido e sólido (quando possível)
- Data da coleta
- Temperatura ambiente e do óleo
- Umidade relativa do ar

3.2.4 Procedimento de Coleta

O procedimento de coleta seguiu o padrão estabelecido pela ABNT NBR 8840/1992 (ABNT, 1992).

3.2.5 Número de Amostras e Distribuição

De modo a diminuir o erro estatístico recorrente de todo o plano de amostragem, bem como permitir que sejam amostrados transformadores com diferentes tempos de operação, foram coletados, aproximadamente, 50 máquinas elétricas. Estas amostras foram distribuídas de acordo com o plano detalhado na TABELA 2.

TABELA 2 – PLANO DE AMOSTRAGEM DE ACORDO COM O TEMPO DE OPERAÇÃO DO TRANSFORMADOR.

Tempo de Operação do Transformador	Número de Amostras
0 a 1 ano	5 amostras
1 a 5 anos	10 amostras
5 a 10 anos	10 amostras
10 a 15 anos	10 amostras
Superior a 15 anos	15 amostras

3.2.6 Equipamentos amostrados

Na TABELA 3, estão apresentadas as descrições das amostras coletadas, separadas por tempo de operação do equipamento. Foi obtido, juntamente das amostras, o histórico de vida útil, quanto às trocas de OMI e os ensaios físico-químicos e de CF da maioria dos pontos amostrados (ANEXO).

Informações obtidas da concessionária sugerem que os equipamentos novos, de tempo de vida inferior a 10 anos, utilizem apenas papel termoestabilizado ou uma mistura do material com papel Kraft convencional.

TABELA 3 – RELAÇÃO DE TRANSFORMADORES AMOSTRADOS.

Identificação					
0 a 1 ano de Operação					
1A	Botucatu (33)	TR-4	Trifásico	Toshiba	Out. 2009
Identificação					
1 a 5 anos de Operação					
1B	Bom Jardim (57)	TR-3	Fase Azul	Siemens	Set. 2006
2B	Bom Jardim (59)	TR-3	Fase Branca	Siemens	Set. 2006
3B	Bom Jardim (61)	TR-3	Fase Vermelha	Siemens	Set. 2006
Identificação					
5 a 10 anos de Operação					
1C	Botucatu (29)	TR-1	Trifásico	Siemens	Mar.2006
2C	Botucatu (31)	TR-2	Trifásico	Siemens	Mai.2006
3C	Cabreuva (47)	TR-7	Fase Azul	ABB	Jun.2004
4C	Cabreuva (45)	TR-7	Fase Branca	ABB	Jun.2004
5C	Cabreuva (49)	TR-7	Fase Vermelha	ABB	Jun.2004
6C	Sumaré (15)	TR-2	Fase Azul	ABB	Jun.2002 / Out.2005
7C	Sumaré (13)	TR-2	Fase Branca	ABB	Jun.2002 / Out.2005
8C	Sumaré (11)	TR-2	Fase Vermelha	ABB	Jun.2002 / Mar.2007
Identificação					
10 a 15 anos de Operação					
1D	Embú-Guaçú (17)	TR-2	Fase Azul	ABB	Out.1996
2D	Embú-Guaçú (19)	TR-2	Fase Branca	ABB	Out.1996
3D	Embú-Guaçú (21)	TR-2	Fase Vermelha	ABB	Out.1996
4D	Oeste (7)	TR-3	Fase Branca	Siemens	Nov.2000
5D	Oeste (9)	TR-3	Fase Vermelha	Siemens	Nov.2000
6D	Porto Ferreira (1)	TR-1	Trifásico	Siemens	Mai.1999
Identificação					
Superior a 15 anos de Operação					
1E	Mogi Mirim III (25)	TR-2	Fase Azul	Coemsa	Set.1991
2E	Mogi Mirim III (23)	TR-2	Fase Branca	Coemsa	Set.1991
3E	Mogi Mirim III (27)	TR-2	Fase Vermelha	Coemsa	Set.1991
4E	Bom Jardim (53)	TR-2	Fase Azul	BBC	Mai.1983 / Dez.1985
5E	Bom Jardim (55)	TR-2	Fase Branca	BBC	Mai.1983 / Out.1986
6E	Bom Jardim (51)	TR-2	Fase Vermelha	BBC	Mai.1983 / Ago.2003
7E	Cabreuva (43)	TR-2	Fase Azul	ASEA	Mai.1978 / Jun.1994
8E	Cabreuva (39)	TR-2	Fase Branca	ASEA	Mai.1978 / Mar.1993
9E	Cabreuva (41)	TR-2	Fase Vermelha	ASEA	Mai.1978 / Nov. 1993
10E	Casa Branca (3)	TR-1	Trifásico	GE	Out.1979 / Nov. 1999
11E	Casa Branca (5)	TR-2	Trifásico	GE	Jun.1978 / Out.2000
12E	Botucatu (35)	TR-5	Trifásico	BBC	Fev.1982 / Set.1995
13E	Botucatu (37)	TR-6	Trifásico	GE	Mar.1981 / Nov.2001

3.2.7 Envio das Amostras ao Laboratório

Após coletadas, as amostras e identificações dos equipamentos foram encaminhadas ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – Departamento de Materiais, para análise.

3.2.8 Análises do óleo mineral isolante coletado

Sobre as amostras coletadas foram realizados os mesmos ensaios aplicados às amostras envelhecidas em laboratório, de modo a permitir a aplicação do estudo desenvolvido.

3.3 METODOLOGIAS APLICADAS

3.3.1 Tensão Interfacial do Óleo Mineral Isolante

A tensão interfacial, expressa em mN.m^{-1} ou dina.cm^{-1} , representa a força necessária para que um anel de platina rompa a interface água-óleo, sendo uma medida indireta da concentração de compostos polares presentes no OMI. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma brasileira NBR 6234/1965 (ABNT, 1965), em condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar (25 °C e 55%), sendo utilizado o equipamento Tensiômetro KRÜSS, modelo K10ST.

3.3.2 Índice de Neutralização do Óleo Mineral Isolante

O índice de neutralização, expresso em mg KOH.g^{-1} de OMI, é a medida da quantidade necessária de base (hidróxido de potássio – KOH) para neutralizar os

constituintes ácidos presentes em 1 g de OMI. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 14248/2004 (ABNT, 2004), em condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar (25 °C e 55%), sendo utilizado o equipamento 716 DMS Titrino Metrohm.

Para fluidos isolantes em uso, o índice de neutralização é um indicador indireto do seu grau de oxidação. A formação de ácidos como produto final da degradação do óleo mineral é uma das principais conseqüências de seu processo de envelhecimento. A presença destes compostos em concentrações significativas é bastante prejudicial, uma vez que reagem com os materiais de formação do equipamento, especialmente com o isolamento sólido, diminuindo a vida útil do transformador. Com o tempo, estes ácidos podem ainda polimerizar-se, formando uma borra espessa que dificulta a troca de calor com o ambiente quando é depositada nas partes ativas da máquina.

3.3.3 Fator de Potência a 90 °C (Óleo Mineral Isolante)

O ensaio de Fator de Potência a 90 °C, expresso em %, representa a medida das perdas em um líquido isolante quando submetido a 90 °C e a um campo elétrico alternado. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 12133/1991 (ABNT, 1991), em condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar (25 °C e 55%), sendo utilizado o equipamento TETTEX AG Instruments, tipo 2822 HS. As amostras foram submetidas à frequência de 60 Hz e uma corrente de 1,5 kV.

O fator de potência em um transformador, expresso em %, representa a quantidade de energia dissipada pelo líquido isolante na forma de calor ao longo da operação de um equipamento. Do ponto de vista químico, corresponde diretamente à corrente dissipada no OMI e, indiretamente, aos produtos polares e polarizáveis, partículas metálicas ou não metálicas.

Durante a vida útil de transformadores, a propriedade de fator de potência tende a apresentar um aumento gradativo em função da degradação dos materiais. De acordo com o Regulamento Técnico ANP nº 4, de 2008 da Agência Nacional do

Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (BRASIL, 2008), o limite máximo para fator de potência a 90 °C é de 0,4% para OMI novo. É recomendável a regeneração ou substituição do OMI para um fator de perdas superior a 15% (TULIO, 2008).

3.3.4 Compostos Furânicos em Óleo Mineral Isolante, por Cromatografia em fase Líquida

A concentração dos CF dissolvidos em óleo mineral foi determinada por Cromatografia em fase Líquida de Alta Pressão e Alta Resolução (HPLC), de acordo com a norma NBR 15349/2006 (ABNT, 2006). As amostras foram preparadas pelo método de extração líquido-líquido, sob condições controladas de temperatura e umidade do ar (20 °C e 55%, respectivamente). A coluna utilizada para análise foi a “UV Carbamate Analysis”, C18, (4,6 x 250) mm, 5 µm.

A análise consistiu na obtenção de cromatogramas para cada uma das amostras, com identificação dos picos para os tempos de retenção das substâncias em ensaio. Para cada um destes picos, foi verificado o espectro de absorção de radiação ultravioleta, de acordo com a normatização, sendo estes então comparados a espectros de padrões de referência de cada um dos CF.

As amostras que apresentaram concentrações muito altas para algum (ou vários) CF foram diluídas 50 vezes em OMI novo (o mesmo utilizado para constituição das amostras do envelhecimento) antes da realização do ensaio. De forma confirmatória, foram analisados os espectros obtidos com e sem a diluição das amostras, em comparação aos padrões de referência.

3.3.5 Compostos Furânicos em Óleo Mineral Isolante, por Colorimetria

Das amostras em estudo laboratorial, foram selecionadas oito sujeitas à temperatura de 100 °C por diferentes intervalos de tempo de envelhecimento, para a determinação da concentração de 2-FAL pelo método colorimétrico. Este ensaio foi

desenvolvido também seguindo a norma NBR 15349/2006 (ABNT, 2006), sendo, adicionalmente, verificado o espectro de UV resultante. As amostras foram preparadas pelo método de extração líquido-líquido, sob condições controladas de temperatura e umidade do ar (19 °C e 55%, respectivamente), sendo utilizado o equipamento Espectrofotômetro UV-VIS Shimadzu UV mini 1240.

3.3.6 Ensaio Termogravimétrico de Óleo Mineral e Papel Isolante

De modo a verificar o comportamento da perda de massa de amostras de OMI e papel (termoestabilizado e convencional) novos e envelhecidos por 240 dias, a 100 °C, foram feitos ensaios termogravimétricos (TGA) sobre os materiais. A análise foi realizada de acordo com a norma ASTM E 1131 (ASTM, 1993), em balança termogravimétrica NETZSCH, modelo TG – 209, com taxa de aquecimento de 20 °C/min. As curvas de TGA foram obtidas de 20 a 550 °C em atmosfera inerte e de 550 a 850 °C em atmosfera oxidante (utilizando respectivamente nitrogênio e oxigênio como gás de arraste).

3.3.7 Grau de Polimerização do Papel Isolante

O papel isolante é um dos principais indicadores da vida útil de um transformador, uma vez que não pode ser substituído ou regenerado ao longo da operação do equipamento. Além disso, a amostragem do material só pode ser realizada com a parada da máquina, o que dificulta a realização do diagnóstico necessário para a manutenção preventiva. Altas temperaturas, além da interação com o catalisador cobre, são os principais responsáveis pela quebra das cadeias de celulose que formam o isolamento sólido. Este rompimento de cadeias, analisado pelo ensaio de GP, provoca a diminuição da resistência e da capacidade isolante do papel, que perde a sua função nos equipamentos elétricos. Para o ensaio em questão, quanto maior foi o valor do GP, maior a massa molar do papel e,

consequentemente, melhor é a sua resistência mecânica. Papéis novos chegam a apresentar valores de GP entre 1000 e 1400, podendo chegar à faixa de 250 a 400 ao longo do envelhecimento.

As amostras de papel foram isoladas do sistema de envelhecimento laboratorial em sacos plásticos pequenos, devidamente identificados. Para cada uma destas foi realizado o ensaio viscosimétrico de GP, de acordo com a norma NBR IEC 60450/2009 (ABNT, 2009). Os ensaios realizados foram verificados quanto ao decaimento do GP para cada uma das temperaturas e comparativamente para os diferentes tipos de papel, frente à formação de CF em OMI.

3.3.8 Microscopia Eletrônica de Varredura do Papel Isolante

As técnicas de microscopia permitem a visualização das alterações da superfície de determinados materiais, detalhando inclusive alterações estruturais que podem acontecer ao longo de processos de envelhecimento. No caso dos papéis isolantes, a exposição a altas temperaturas, em longo prazo, pode levar ao aumento da fragilidade do mesmo, com a quebra das fibras e conseqüente diminuição da densidade, com o aparecimento de espaços vazios.

Neste sentido, optou-se pela realização de análises usando MEV de modo a verificar, microscopicamente, as alterações do material sujeito ao envelhecimento, bem como as comparações entre ambos os tipos de isolamento sólido. Sendo assim, especificamente para o estudo a 100 °C, foi realizada a análise de MEV para amostras sujeitas a 7, 43, 119 e 240 dias de envelhecimento, tanto para o papel Kraft termoestabilizado, quanto o convencional.

As amostras foram recobertas com ouro em um metalizador Sputter Coater SCD 005 e foi utilizado um microscópio Philips XL 30 com fonte de elétrons de filamento de tungstênio e microsonda com análise de energia dispersiva acoplada (EDS).

3.3.9 Ensaios Mecânicos de Resistência à Tração do Papel

Ao longo do envelhecimento térmico de papéis isolantes há um enfraquecimento das fibras do material, conseqüente da perda de massa da celulose, detectada pelo ensaio de GP. Com isso, o isolamento sólido se torna mais friável e quebradiço devido à perda de suas propriedades mecânicas.

De modo a determinar a força máxima necessária para rompimento de amostras de papel Kraft termoestabilizado e convencional ao longo do envelhecimento com OMI, foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à tração. Foram selecionadas amostras envelhecidas por diferentes intervalos de tempo a 100 °C. Para cada análise, foram realizadas 5 medidas distintas, possibilitando o estudo estatística dos dados.

Os ensaios foram realizados sob condições controladas de temperatura e umidade do ar (19 °C e 55%, respectivamente), com o equipamento de ensaio mecânico INSTRON 4467, sendo utilizada uma célula de carga de 100 N, com velocidade de $8,34 \cdot 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$.

4 RESULTADOS

4.1 ESTUDO EXPERIMENTAL DE ENVELHECIMENTO ACELERADO DE ÓLEO MINERAL E PAPEL ISOLANTE

De modo a otimizar a comparação entre os materiais utilizados no estudo e devido à diferença de espessura dos papéis termoestabilizado e convencional, todas as metodologias adotadas para a análise das amostras envelhecidas em laboratório foram adotadas também para as 9 amostras com área e massa equivalentes de isolamento sólido. Uma vez que não houve variação dos resultados para nenhum dos parâmetros ao longo de toda a pesquisa, foram adotados apenas aqueles desenvolvidos com equivalência de área que, também, já haviam sido consagrados como válidos na literatura (BASSETO FILHO, MACNUTT, & GRIFFIN, 1993).

4.1.1 Caracterização do Isolamento Líquido – Óleo Mineral Isolante

Os resultados obtidos e apresentados na TABELA 4, na etapa de caracterização do OMI, revelaram um material de boa qualidade e em acordo com o padrão para óleo novo estabelecido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (BRASIL, 2008). Estes resultados qualificaram a matéria prima como propícia para utilização no projeto em questão.

TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO DO OMI NOVO UTILIZADO

Ensaio	Resultado	Valor Limite da ANP
Aspecto visual	Claro e Límpido	Claro, límpido e isento de impurezas
Cor	0,0	1,0 (máx)
Densidade a 20 °C	0,8883 g.ml ⁻¹	0,8610 - 0,9000 g.ml ⁻¹
Viscosidade a 40 °C	9,68 cSt	12,0 cSt (máx)
Viscosidade a 100 °C	2,42 cSt	3,0 cSt (máx)
Ponto de fulgor	140 °C	140 °C
Ponto de fluidez	-39°C	-39 °C
Índice de neutralização	0,01 mg KOH. g ⁻¹ óleo	0,03 mg KOH. g ⁻¹ óleo (máx)
Teor de água	15 ppm m.m ⁻¹	35 mg.kg ⁻¹ (máx)
Fator de potência a 25 °C	0,0007%	0,05% (máx)
Fator de potência a 90 °C	0,20%	0,40% (máx)
Rigidez dielétrica (eletrodo de disco)	53 kV	30 kV (mín)
Rigidez dielétrica (eletrodo de calota)	60 kV	42 kV (mín)
Tensão interfacial	51,1 dina. cm ⁻¹	40 dina. cm ⁻¹ (mín)
Composição carbônica	Ca= 2%, Cn= 58%, Cp= 40%	--
Estabilidade à oxidação, (164 h)	Acidez= 0,03 mg KOH. g ⁻¹ óleo Teor de Borra= 0,01%	Acidez= 0,40 mg KOH. g ⁻¹ óleo (máx)
PCB	< 2,0 mg. L ⁻¹	Teor de Borra= 0,10% (máx)
DBPC	0,30% p.p ⁻¹	não detectável
Enxofre corrosivo	Não corrosivo	0,33% p.p ⁻¹ (máx)

4.1.2 Caracterização do Isolamento Sólido

4.1.2.1 Análise de Umidade de Papel Isolante por Infravermelho

Após a secagem do material, as amostras de papel Kraft convencional e termoestabilizado foram analisadas quanto à presença de umidade, sendo os resultados detalhados na TABELA 5.

De acordo com os resultados obtidos, é possível notar que o procedimento de secagem atingiu seu objetivo, removendo grande parte da umidade do papel isolante.

TABELA 5 – RESULTADOS DA ANÁLISE DA UMIDADE DO PAPEL ISOLANTE		
Material	Umidade Antes da Secagem (%)	Umidade Após Secagem (%)
Papel Kraft Termoestabilizado	2,15	0,68
Papel Kraft Convencional	1,48	0,46

4.1.2.2 Espectroscopia na Região do Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os resultados obtidos para caracterização por FTIR do papel Kraft, convencional e termoestabilizado, estão apresentados na FIGURA 13.

A partir da observação dos espectros, é possível verificar a semelhança entre as curvas de ambos os tipos de isolamento sólido, nos quais foi possível determinar apenas os grupos funcionais constituintes da celulose. Na região entre 3500 e 3080 cm^{-1} foi identificado o estiramento de ligação de hidrogênio do grupamento O-H; na região entre 1350 e 1260 cm^{-1} identificou-se uma deformação intensa do mesmo grupo, ambas características de álcool primário e secundário. Estiramentos do grupo C-O foram identificados nas regiões entre 1075-1000 cm^{-1} (álcool primário) e 1125-1090 cm^{-1} (álcool secundário). Verificou-se ainda a presença

de bandas de estiramento e deformação fracas para o grupamento C-H, para as regiões entre $2900-2880\text{ cm}^{-1}$ e $1350-1320\text{ cm}^{-1}$ (respectivamente). A banda de absorção da região de 670 cm^{-1} representa, possivelmente, a vibração de média intensidade dos grupamentos C-C da celulose. Foram identificados ainda estiramento simétrico e assimétrico de C-O-C nas regiões entre $1100-1090\text{ cm}^{-1}$ e $820-805\text{ cm}^{-1}$.

Não foi possível, porém, a verificação clara de compostos ou modificações químicas decorrentes do processo de termoestabilização do papel isolante, como é o caso de grupos amina, acrilatos e uréia. As pequenas diferenças observadas foram decorrentes das condições locais de análise (presença de ruídos, dióxido de carbono, umidade do ar) e foram insignificantes em termos de valores de absorbância.

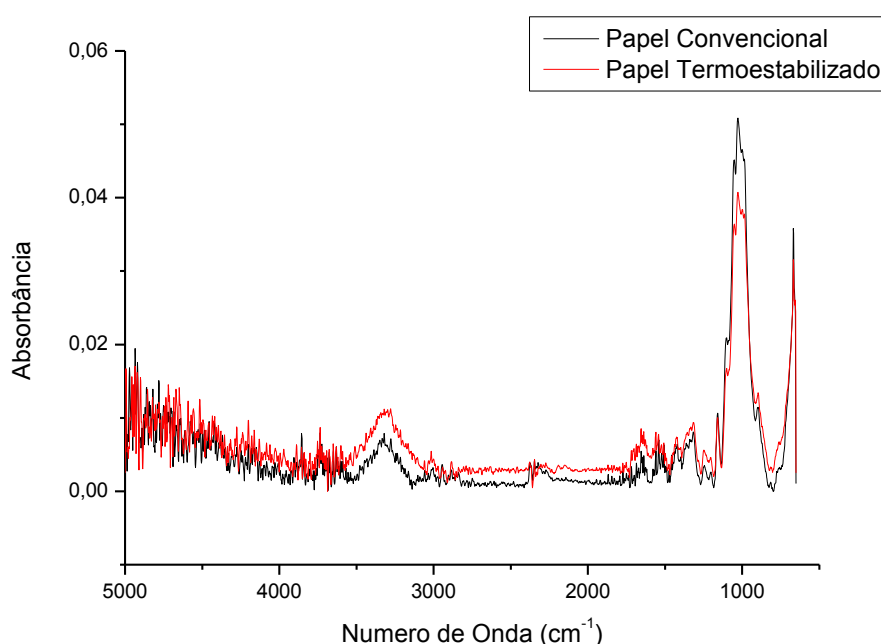


FIGURA 13 – CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PAPEL TERMOESTABILIZADO E CONVENCIONAL PELA ANÁLISE FTIR.

FONTE: O autor (2010).

4.1.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As micrografias das superfícies foram obtidas por MEV para o isolamento

sólido em papel convencional e termoestabilizado, com ampliação de 150x (FIGURA 14) e de 1000x (FIGURA 15). Qualitativamente, nas micrografias pode ser observada uma fase densa, intercalada com fibras transversais de diferentes dimensões e ordens de grandeza para ambos os tipos de isolamento sólido.

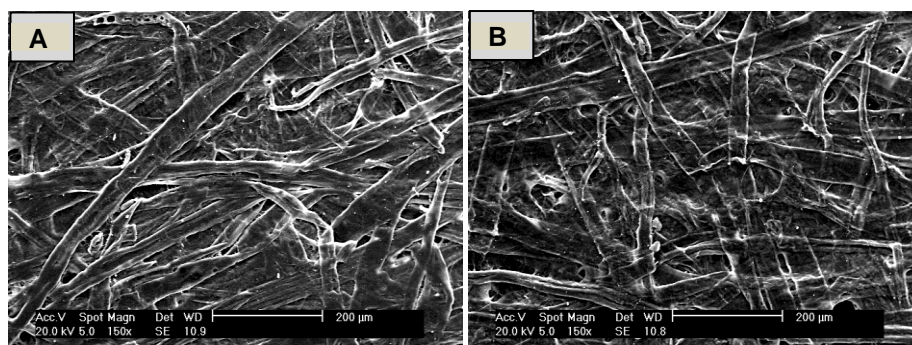


FIGURA 14 – MICROGRAFIAS POR MEV DO PAPEL: (A) CONVENCIONAL E (B) TERMOESTABILIZADO (150X).

FONTE: O autor (2010).

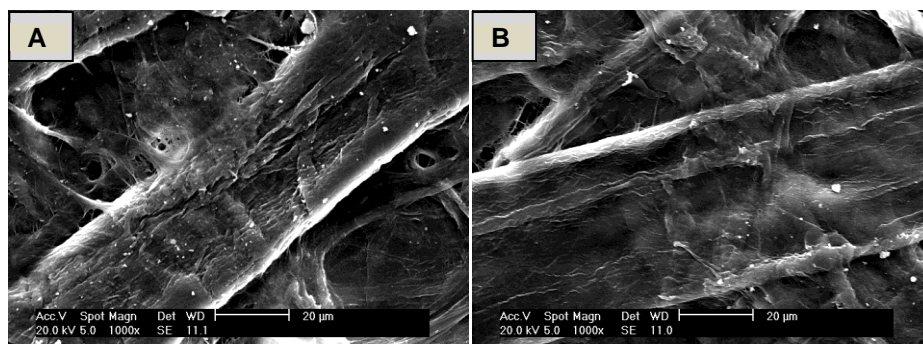


FIGURA 15 – MICROGRAFIAS POR MEV DO PAPEL: (A) CONVENCIONAL E (B) TERMOESTABILIZADO (1000X).

FONTE: O autor (2010).

4.2 METODOLOGIAS APLICADAS

As amostras envelhecidas em laboratório e em campo foram investigadas quanto ao estado de conservação dos materiais envolvidos e a formação de subprodutos da degradação do papel em OMI.

4.2.1 Tensão Interfacial do Óleo Mineral Isolante

Na FIGURA 16 estão apresentados os resultados da tensão interfacial em relação ao tempo de envelhecimento a 100 e a 125 °C. A análise de ambos os gráficos revelou haver um decaimento na curva de tensão, indicando a sensibilidade do fluido aos efeitos do estresse térmico. Para o estudo conduzido com papel convencional a 125 °C o OMI apresentou uma degradação significativa, a qual, em condições operacionais (em um transformador, por exemplo) indicaria haver a necessidade de regeneração ou substituição do fluido após 200 dias de envelhecimento.

Sendo a tensão interfacial uma medição indireta da presença de compostos polares em OMI, dentre os quais está a água (TULIO, 2008), seria possível que a umidade inicial do papel exercesse influência no resultado (MARTINS, 2007). Porém, de acordo com os dados de umidade do isolamento sólido, apresentados na TABELA 5, ambos os materiais foram devidamente secos antes do início do envelhecimento. Mais ainda, de acordo com os resultados, o papel termoestabilizado apresentou uma quantidade superior de água em relação ao isolamento convencional, da ordem de 0,2%. Isso tenderia a justificar uma curva com decaimento mais acentuado para o primeiro em relação ao segundo, o que não ocorreu. Acredita-se, portanto, que os resultados de tensão interfacial para o OMI na presença de papel convencional se devam aos efeitos deletérios da temperatura sob o fluido isolante. Além disso, a degradação térmica do isolamento sólido leva à formação de diversos compostos em OMI, dentre os quais está a água (MARTINS, 2007). Assim, uma maior degradação do papel, para uma mesma umidade inicial do material, provocaria uma curva de tensão decrescente de forma mais rápida, como é possível verificar na análise dos resultados da tensão interfacial para OMI na presença de papel convencional e termoestabilizado.

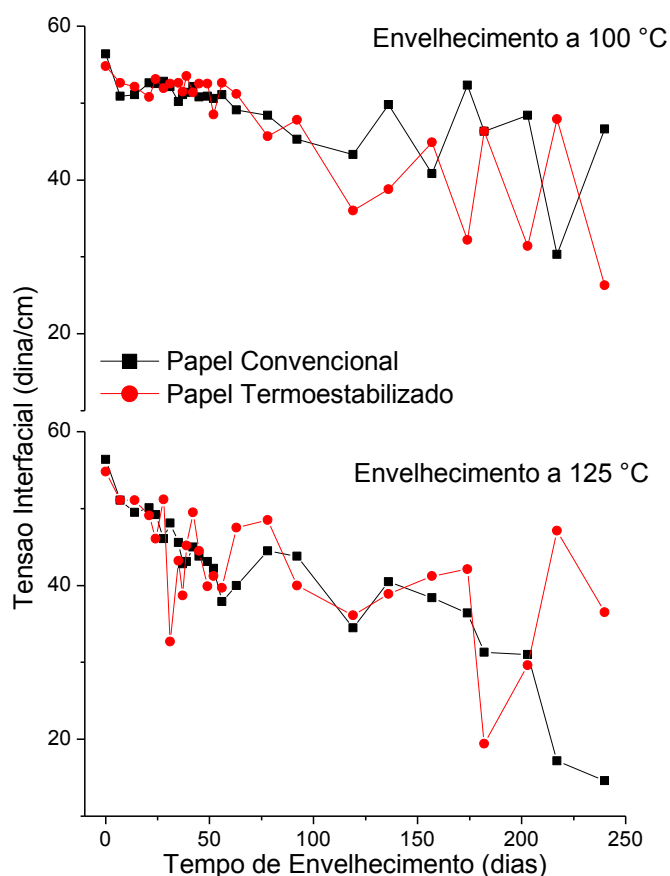


FIGURA 16 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DA TENSÃO INTERFACIAL EM ÓLEO AO LONGO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO.

FONTE: O autor (2010).

Paralelamente, no estudo conduzido com amostras envelhecidas em equipamentos de campo, foram realizados ensaios de tensão interfacial. Na FIGURA 17, estão apresentados os resultados obtidos. Conforme evidenciado pelo gráfico, a grande maioria dos transformadores amostrados (75%, aproximadamente) apresentaram OMI em condições mediana, com tensão acima de 35 dina.cm^{-1} . Aqueles que apresentaram valores mais baixos (em torno de 20 dina.cm^{-1}) para o parâmetro foram identificados, por meio dos dados do histórico de manutenção das máquinas (ANEXO), como equipamentos com óleo utilizado por período maior de tempo em relação aos demais, sendo coincidentemente os equipamentos mais antigos (em operação a mais de 35 anos).

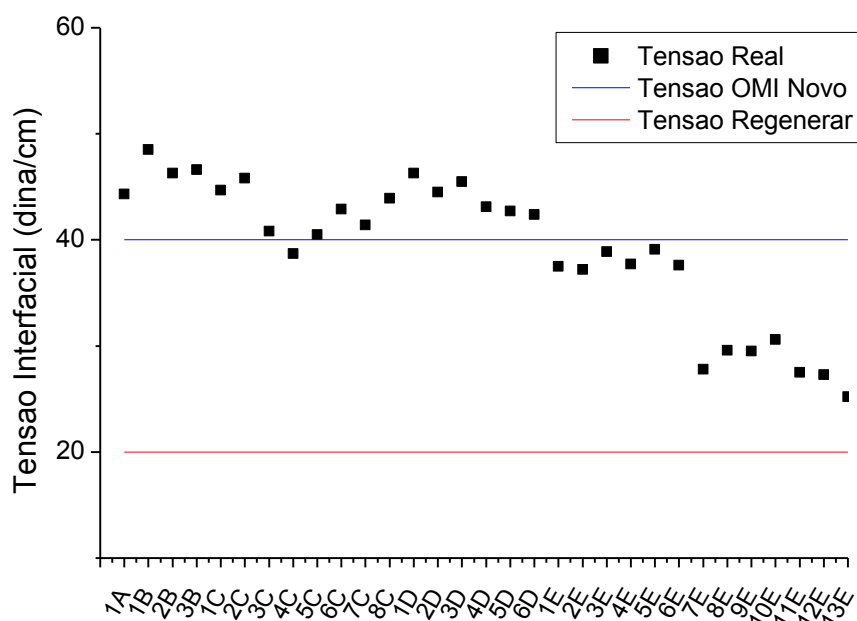


FIGURA 17 – RESULTADOS OBTIDOS PARA A TENSÃO INTERFACIAL DAS AMOSTRAS DE OMI COLETADAS.

FONTE: O autor (2010).

4.2.2 Índice de Neutralização do Óleo Mineral Isolante

Os resultados de índice de neutralização do OMI, para ambas as temperaturas, ao longo do tempo, tanto para o papel termoestabilizado quanto para o papel convencional, estão apresentados na FIGURA 18. De acordo com o gráfico, para todas as temperaturas e materiais de trabalho, praticamente não houve variação do parâmetro. Com exceção das duas últimas amostras do envelhecimento de papel convencional sujeitas a 125 °C, as quais apresentaram formação de borra, os resultados obtidos foram constantes e iguais ao do óleo novo.

Conforme verificado na revisão bibliográfica, o índice de neutralização é um indicador da presença de compostos ácidos em OMI, e a formação destes produtos se dá em estágios bastante avançados de degradação térmica do fluido, ou em presença de demais catalisadores, como o oxigênio (MAK, BASSETO FILHO, AITA, 2005). Uma vez que houve a variação dos resultados de tensão interfacial para o estudo laboratorial (FIGURA 16), verifica-se o envelhecimento do OMI, porém em estágios preliminares dos mecanismos de peroxidação. Apenas as duas últimas

amostras do estudo conduzido com papel convencional a 125 °C é que apresentaram variação do índice de neutralização, o que indica degradação significativa do OMI com presença de compostos ácidos, seja esta provocada pelos efeitos do estresse térmico, ou ainda por uma entrada indesejada (e não controlada) de oxigênio nos frascos.

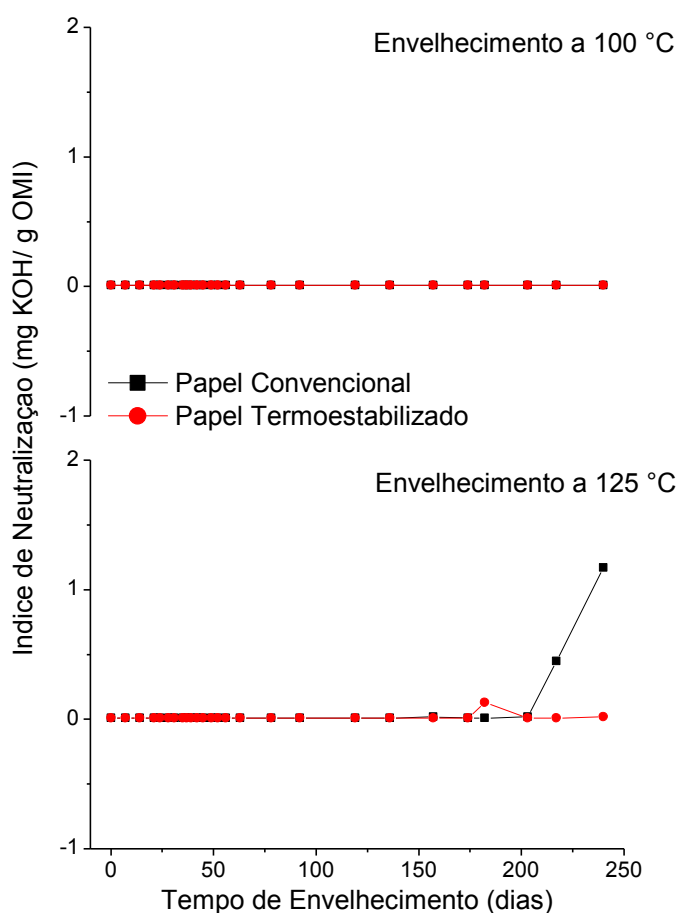


FIGURA 18 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE NEUTRALIZAÇÃO EM OMI AO LONGO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO.

FONTE: O autor (2010).

De forma semelhante, o ensaio de índice de neutralização foi realizado sobre o OMI amostrado do banco de transformadores da concessionária. Os resultados obtidos estão detalhados na FIGURA 19. De acordo com o gráfico, as amostras coletadas não apresentaram variação significativa nos valores de índice de neutralização, mantendo-se o parâmetro semelhante ao determinado para OMI novo.

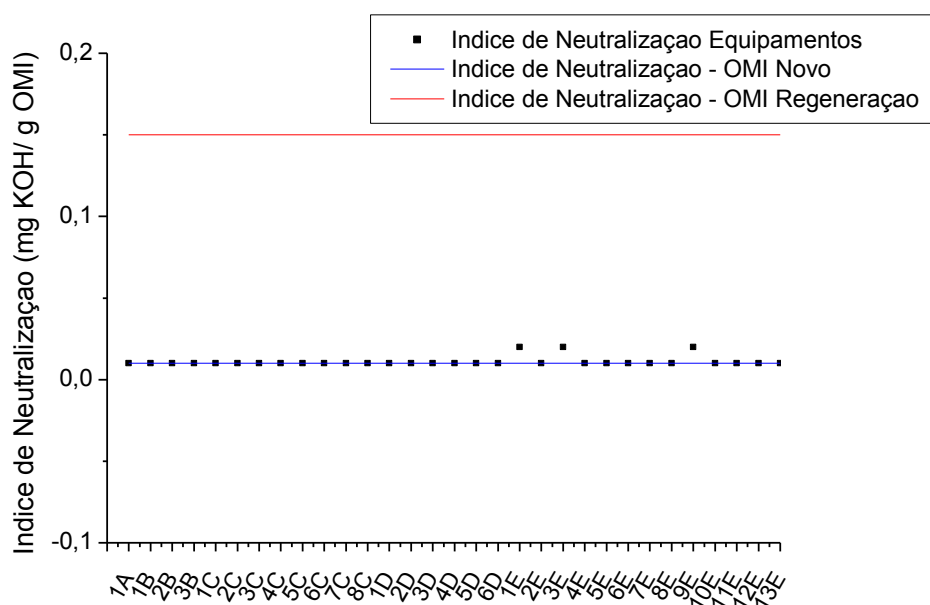


FIGURA 19 – RESULTADOS OBTIDOS PARA O ÍNDICE DE NEUTRALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE OMI COLETADAS.

FONTE: O autor (2010).

4.2.3 Fator de Potência do Óleo Mineral Isolante a 90 °C

Os resultados obtidos para o ensaio de fator de potência a 90 °C estão apresentados no gráfico da FIGURA 20. O estudo revelou um comportamento levemente crescente dos valores da propriedade, sem, contudo, apresentar pontos com valores muito elevados, com exceção apenas do trabalho desenvolvido com papel convencional e a 125 °C.

Sendo o parâmetro um indicador indireto da presença de compostos polarizáveis em OMI (MAK, BASSETO FILHO, AITA, 2005), torna-se possível traçar um paralelo com a análise dos resultados de índice de neutralização. Apesar dos dados de tensão interfacial indicar o envelhecimento térmico do fluido, verifica-se uma degradação em estágios preliminares dos mecanismos de peroxidação do OMI. A ausência de oxigênio no sistema possibilitou a conservação de grande parte das características dielétricas do fluido, estando parte dos valores abaixo, inclusive, do limite máximo permitido para óleo novo, que é de 0,40% (BRASIL, 2008). Novamente a exceção foram as duas últimas amostras do estudo conduzido com papel Kraft convencional a 125 °C.

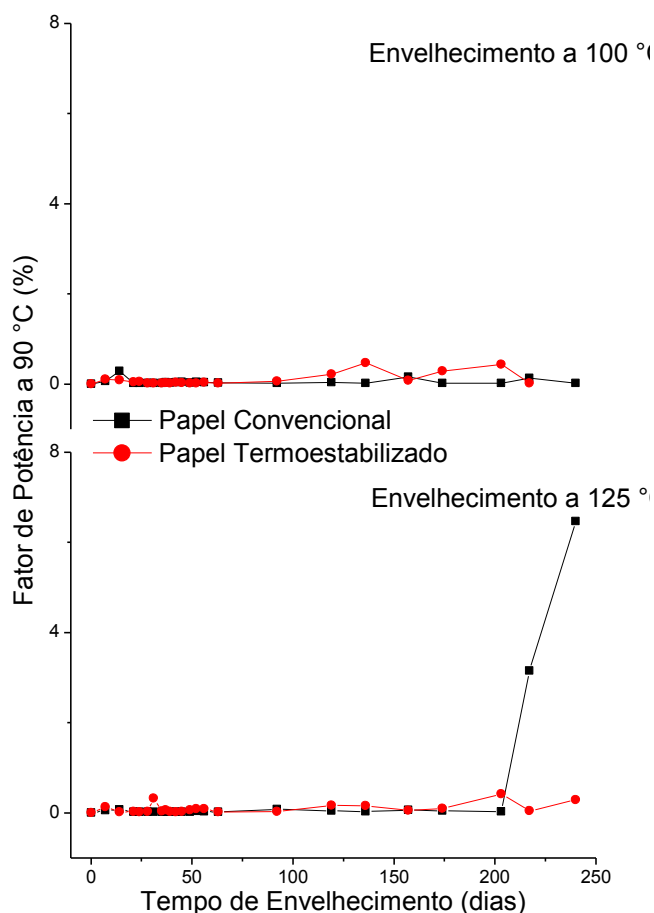


FIGURA 20 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM ÓLEO AO LONGO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO.

FONTE: O autor (2010).

De modo semelhante, as análises efetuadas sobre o OMI dos equipamentos demonstraram, conforme gráfico apresentado na FIGURA 21, que a maioria dos resultados tiveram seus valores de fator de potência abaixo ou em torno de 0,4%, ou seja, muito próximo do limite recomendado pela ANP (BRASIL, 2008).

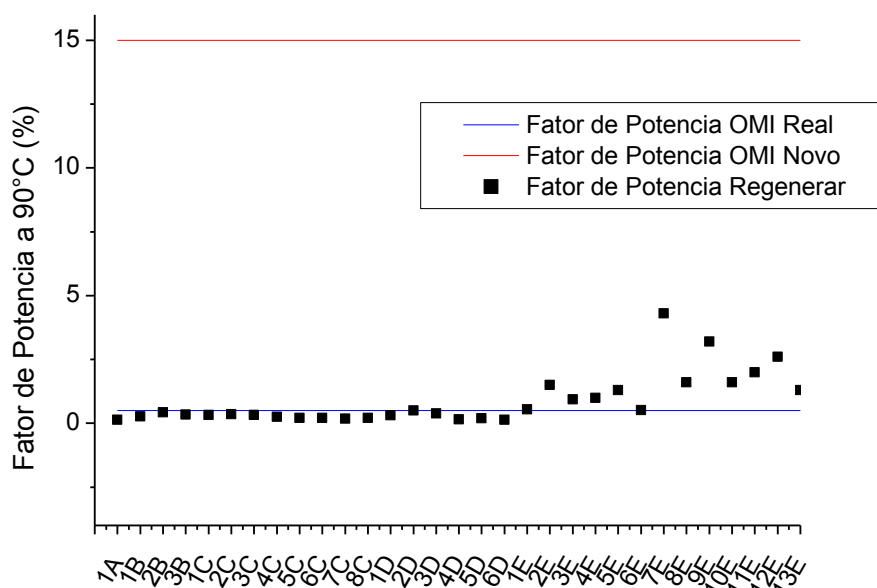


FIGURA 21 – RESULTADOS OBTIDOS PARA FATOR DE POTÊNCIA A 90 °C DAS AMOSTRAS DE OMI COLETADAS.

FONTE: O autor (2010).

4.2.4 Compostos Furânicos em Óleo Mineral Isolante, por Cromatografia em fase Líquida

Na análise de CF por HPLC foram obtidos cromatogramas e espectros para cada uma das amostras do envelhecimento, sendo estes comparados aos dados obtidos para padrões de referência. Nas FIGURAS 22 e 23 são apresentados exemplos de cromatogramas obtidos para OMI envelhecido com papel convencional e termoestabilizado e nas FIGURAS 24 e 25 os seus respectivos espectros.

Para algumas amostras envelhecidas com papel convencional foi necessária a diluição (50 vezes) para análise de CF por HPLC devido à alta concentração, principalmente, de 2-FAL. Os espectros das amostras normal e diluída foram comparados (FIGURA 24), sendo verificada uma similaridade que possibilitou a aplicação do método para quantificação da concentração das amostras.

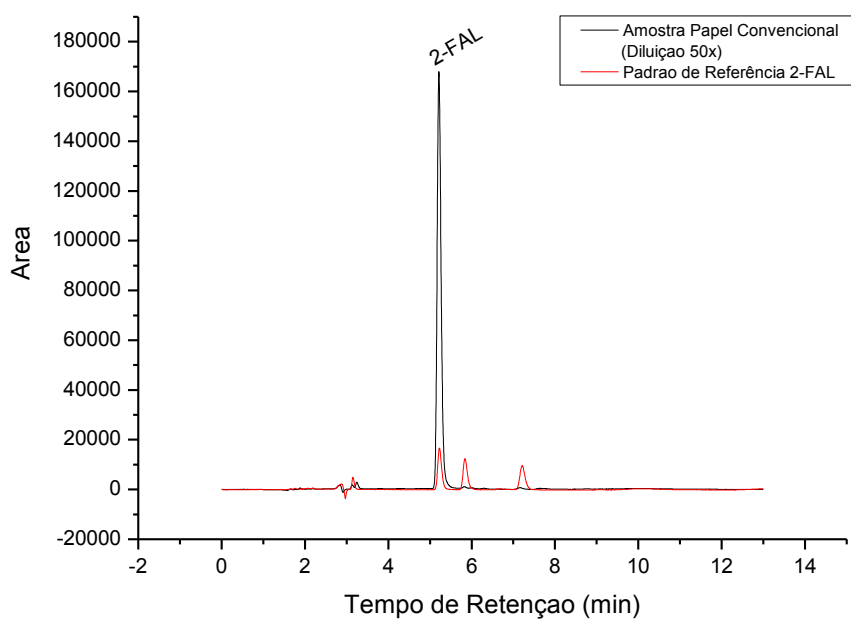


FIGURA 22 – EXEMPLO DE CROMATOGRAMA OBTIDO PARA AMOSTRA DE ÓLEO ENVELHECIDO COM PAPEL CONVENCIONAL.
FONTE: O autor (2010).

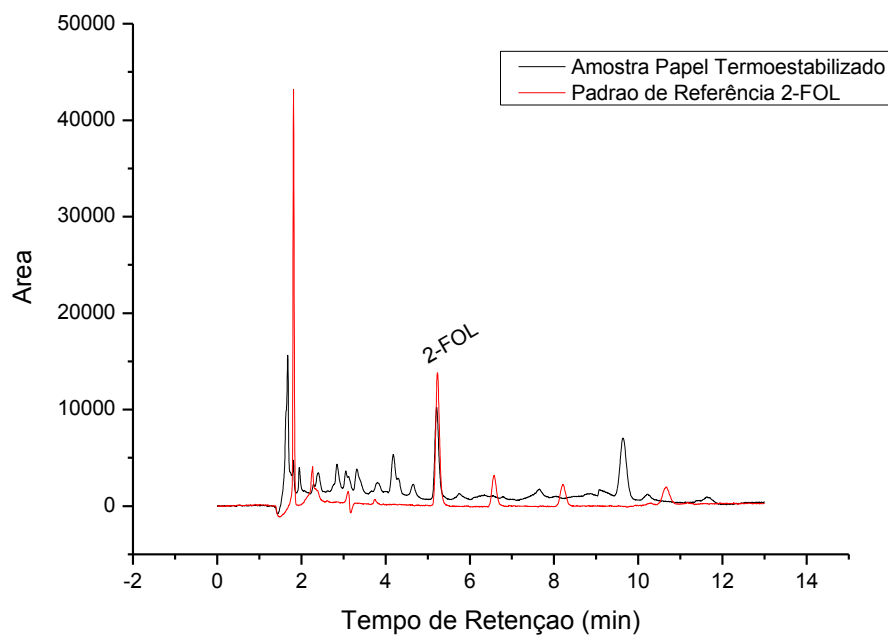


FIGURA 23 – EXEMPLO DE CROMATOGRAMA OBTIDO PARA AMOSTRA DE ÓLEO ENVELHECIDO COM PAPEL TERMOESTABILIZADO.
FONTE: O autor (2010).

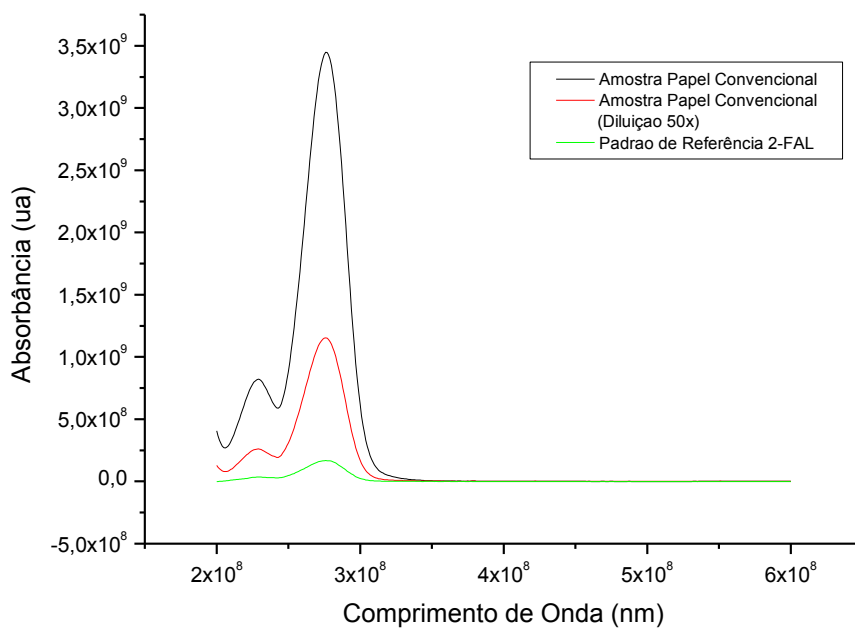


FIGURA 24 – EXEMPLO DE ESPECTRO OBTIDO PARA AMOSTRA DE ÓLEO ENVELHECIDO COM PAPEL CONVENCIONAL.
FONTE: O autor (2010).

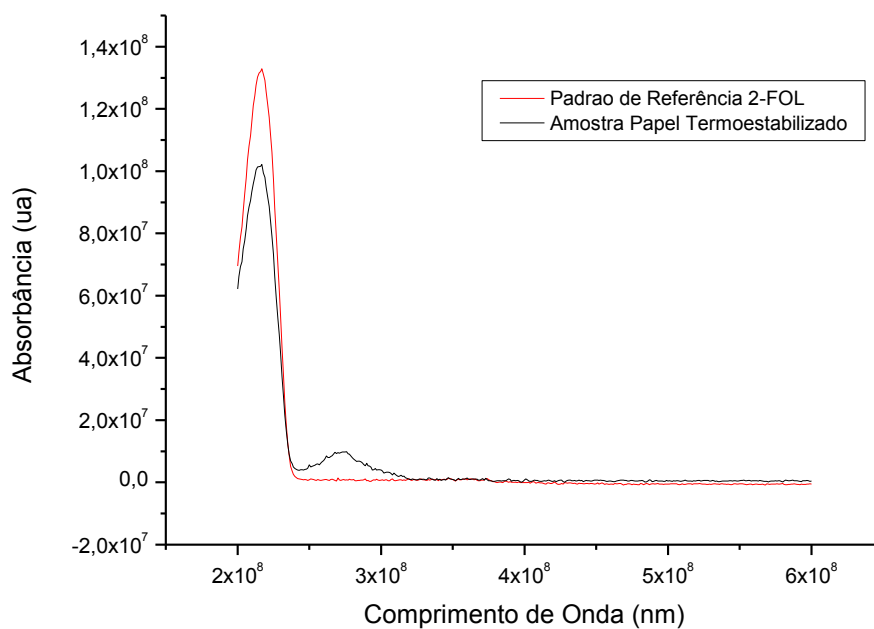


FIGURA 25 – EXEMPLO DE ESPECTRO OBTIDO PARA AMOSTRA DE ÓLEO ENVELHECIDO COM PAPEL TERMOESTABILIZADO.
FONTE: O autor (2010).

A partir dos cromatogramas, a concentração de CF em cada uma das amostras foi quantificada, sendo obtidos resultados para as temperaturas de

envelhecimento. Nas FIGURAS 26 e 27 estão apresentados os resultados para o estudo desenvolvido a 100 °C, e nas FIGURAS 28 e 29, estão os dados do envelhecimento a 125 °C, tanto para sistemas com papel Kraft termoestabilizado, como para o convencional.

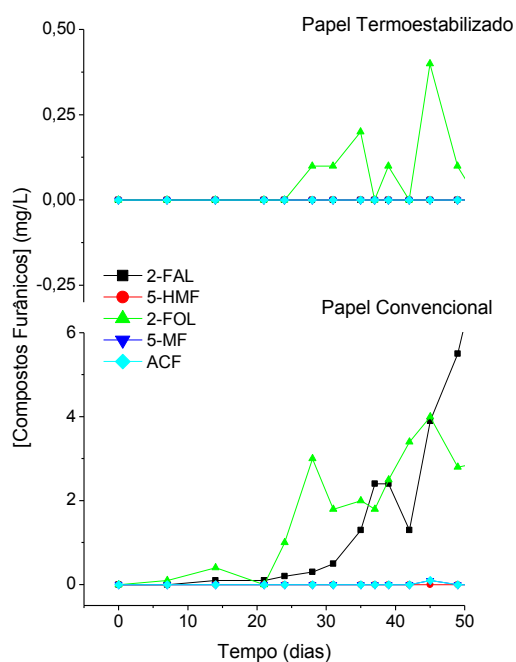


FIGURA 26 – GRÁFICO DA CONCENTRAÇÃO DOS COMPOSTOS FURÂNICOS FORMADOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO (0 A 50 DIAS), PARA O OMI E PAPEL KRAFT A 100 °C.

FONTE: O autor (2010).

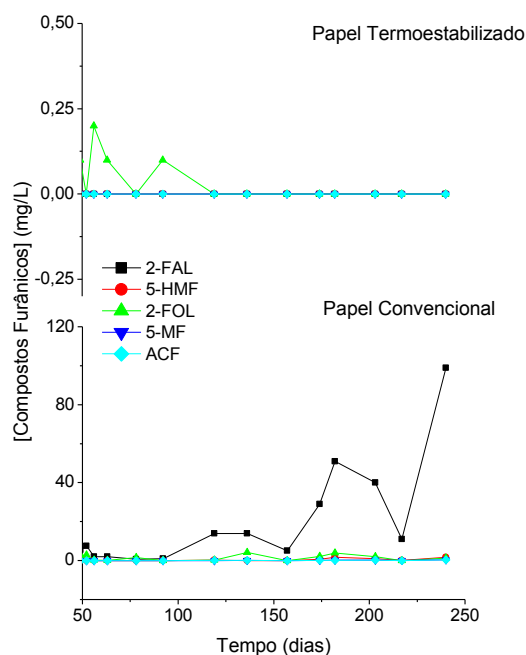


FIGURA 27 – GRÁFICO DA CONCENTRAÇÃO DOS COMPOSTOS FURÂNICOS FORMADOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO (50 A 240 DIAS), PARA O OMI E PAPEL KRAFT A 100 °C.

FONTE: O autor (2010).

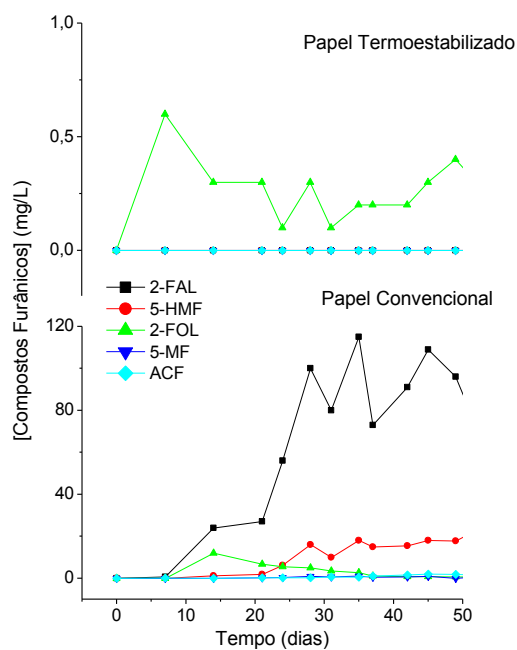


FIGURA 28 – GRÁFICO DA CONCENTRAÇÃO DOS COMPOSTOS FURÂNICOS FORMADOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO (0 A 50 DIAS), PARA O OMI E PAPEL KRAFT A 125 °C.

FONTE: O autor (2010).

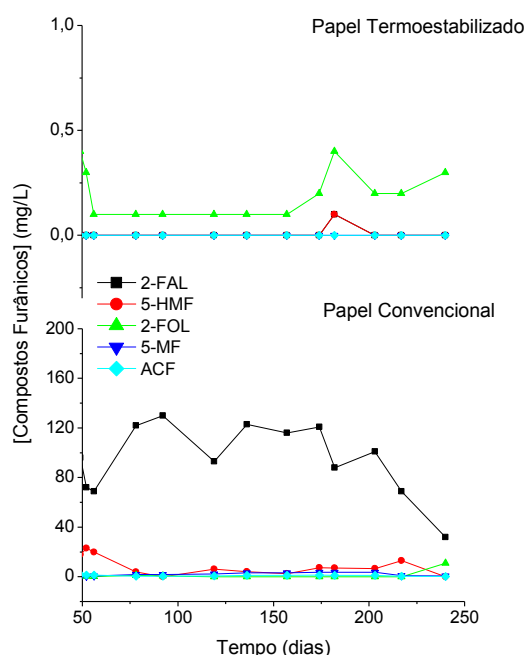


FIGURA 29 – GRÁFICO DA CONCENTRAÇÃO DOS COMPOSTOS FURÂNICOS FORMADOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO (50 A 240 DIAS), PARA O OMI E PAPEL KRAFT A 125 °C.

FONTE: O autor (2010).

De acordo com os resultados expressos nos gráficos, foi possível notar a variação na concentração de todos os CF para o envelhecimento de OMI com papel convencional, desde o início do estudo e para ambas as temperaturas. Dentre estes, destacou-se o 2-FAL, que apresentou aumento gradual de sua concentração para o início do envelhecimento (em torno dos primeiros 50 dias), atingindo valores bastante elevados. Estes resultados se apresentaram superiores, inclusive, aos dados de históricos das concessionárias de energia do país, que consideram significativas concentrações de CF da ordem de 10 mg.L^{-1} (SETFORD, HEYWOOD, SAINI, & BOSWORTH, 2001; BASSETO FILHO, MACNUTT, & GRIFFIN, 1993).

Analisando-se, ainda, os gráficos para o envelhecimento de OMI com papel convencional, é possível notar que a evolução das curvas de concentração do composto 5-HMF apresentou um comportamento ondulatório, destacado no estudo a 125 °C. Ou seja, notou-se que houve uma estabilização na formação, seguida de nova variação na sua concentração. Este padrão é um retrato claro das reações em cadeia que se completam com a formação do 2-FAL, apresentadas por MARTINS (2007).

Para o envelhecimento de OMI com papel termoestabilizado, não foi verificada a formação dos compostos 2-FAL, 5-HMF, ACF e 5-MF. Nos cromatogramas das amostras do envelhecimento, tanto para o estudo conduzido a 100 quanto a 125 °C foi identificado um pico, com o tempo de retenção e espectro coincidentes com os obtidos para o padrão de referência do 2-FOL. De acordo com as FIGURAS 26 a 29, a formação e dissolução do composto em OMI, ao longo do envelhecimento, pôde ser notada logo para as primeiras amostras retiradas da estufa, confirmando o estudo de MARTINS, 2007. A evolução destas curvas apresentou um comportamento diferente do revelado para o 2-FAL nas amostras de OMI envelhecidas com papel convencional devido a dois aspectos principais: aumento pouco gradual das concentrações de 2-FOL ao longo do envelhecimento, o que pode ser um retrato da baixa estabilidade térmica do composto em relação ao 2-FAL, levantada também no estudo de MARTINS (2007); concentrações analisadas para o 2-FOL (em OMI envelhecido com papel termoestabilizado) foram aproximadamente 90% mais baixas em relação aos resultados obtidos para o 2-FAL no estudo conduzido a 125 °C com papel convencional.

De forma semelhante ao desenvolvido com as amostras envelhecidas em laboratório, foram realizados ensaios da formação de CF para o OMI coletado dos transformadores da concessionária. Os resultados obtidos foram inseridos em gráficos da concentração de cada um dos CF, conforme apresentado nas FIGURAS 30 e 31.

Para as amostras de OMI de campo, foram detectados apenas os CF 2-FAL e 5-HMF, e somente em 16% destas. Conforme verificado na literatura, isso não obrigatoriamente indica que o isolamento sólido se apresenta em boas condições, mas que há uma possibilidade de que, devido à regeneração do fluido isolante, o histórico de CF em OMI das máquinas tenha sido perdido. Correlacionando os resultados de presença de 2-FAL e de Tensão Interfacial em OMI (FIGURA 17), em paralelo com os dados de histórico de manutenção das máquinas amostradas (ANEXO), verifica-se a presença de OMI novo ou recém-regenerado em grande parte dos transformadores em estudo. Nos resultados de Tensão Interfacial de parte dos equipamentos foram apresentados valores em torno de 35 dina.cm⁻¹ para alguns

cujo histórico já verificou resultados da ordem de 20 dina.cm^{-1} . Isto possibilita a conclusão de que, para grande parte dos equipamentos, é possível que informações de CF tenham sido perdidas em função do tratamento do fluido isolante.

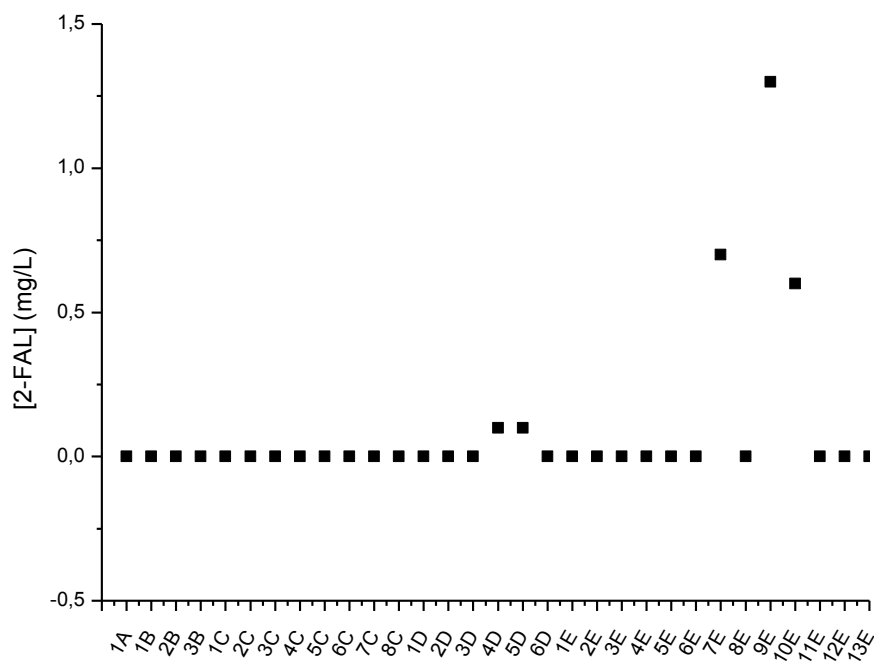


FIGURA 30 – RESULTADOS OBTIDOS PARA A CONCENTRAÇÃO DE 2-FAL DAS AMOSTRAS DE OMI COLETADAS.

FONTE: O autor (2010).

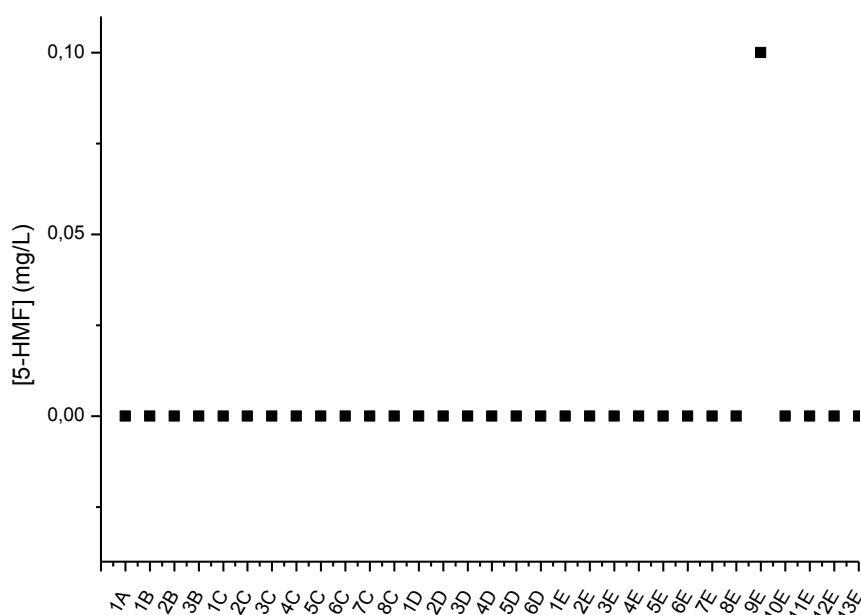


FIGURA 31 – RESULTADOS OBTIDOS PARA CONCENTRAÇÃO DE 5-HMF DAS AMOSTRAS DE OMI COLETADAS.

FONTE: O autor (2010).

4.2.5 Compostos Furânicos em OMI, por Colorimetria

Os resultados obtidos para CF pela técnica colorimétrica, estão apresentados nos gráficos da concentração de 2-FAL pelo tempo de envelhecimento para os papéis termoestabilizado e convencional, conforme a FIGURA 32. Comparando as técnicas clássicas de HPLC e Colorimetria, ambas normatizadas pela NBR 15349/2006 (ABNT, 2006), foi possível notar que os valores resultantes e colocados na forma gráfica evoluíram de forma muito semelhante. Para o papel termoestabilizado, ao longo do envelhecimento, não foi detectada a presença de 2-FAL, enquanto que, para o isolamento sólido convencional, obteve-se uma curva crescente por ambas as técnicas. Porém, verificando as escalas do eixo vertical dos gráficos das FIGURAS 26 a 29 e da FIGURA 32, foi possível notar que pela técnica cromatográfica foi obtido um valor muito mais alto para o mesmo período de envelhecimento, em relação ao método colorimétrico. Atribuiu-se a tal fato a alta concentração do 2-FAL, que pode estar na faixa de saturação do método, não sendo possível a detecção de valores superiores ao obtido, sem que fosse feita adequada

diluição da amostra e posterior cálculo da correta concentração.

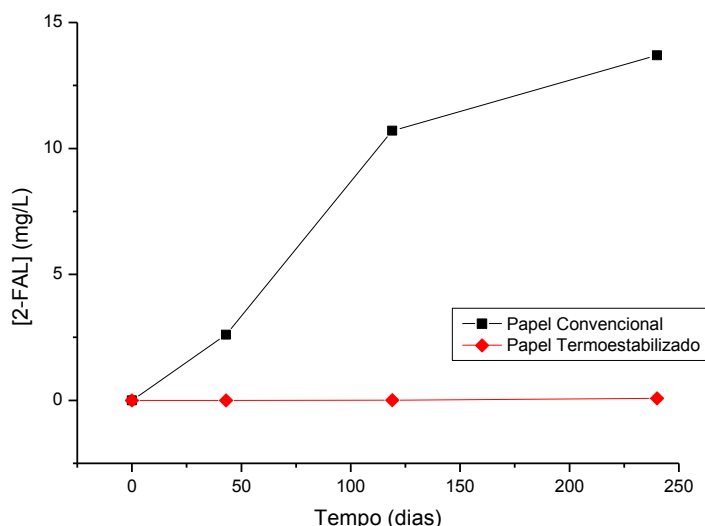


FIGURA 32 – GRÁFICO DA CONCENTRAÇÃO DE 2-FAL COLORIMÉTRICO FORMADO PELO TEMPO, PARA ENVELHECIMENTO DE OMI E PAPEL KRAFT A 100 °C.

FONTE: O autor (2010).

Além do resultado numérico, tem-se, por ser uma técnica colorimétrica, a detecção visual da presença de 2-FAL nas amostras de OMI, uma vez que há variação da coloração da solução de amarelo claro para rosa escuro. Na FIGURA 33, estão apresentadas as cubetas contendo as amostras envelhecidas com papel termoestabilizado e, na FIGURA 34, estão apresentadas as amostras de papel convencional, sendo o envelhecimento crescente ilustrado pelas cubetas dispostas da esquerda para a direita.



FIGURA 33 – ESCALA CRONOLÓGICA DE COLORAÇÃO DAS AMOSTRAS DE 2-FAL COLORIMÉTRICO AO LONGO DO ENVELHECIMENTO DE OMI COM PAPEL TERMOESTABILIZADO DE 7 A 240 DIAS.

FONTE: O autor (2010).

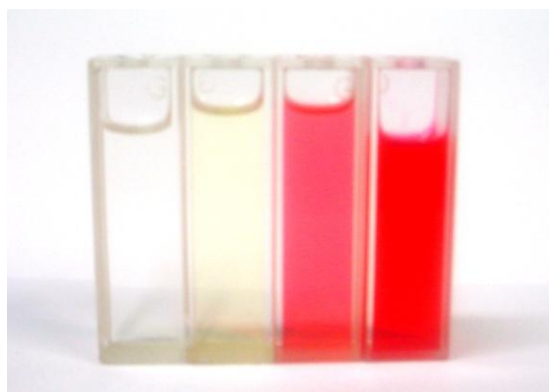


FIGURA 34 – ESCALA CRONOLÓGICA DE COLORAÇÃO DAS AMOSTRAS DE 2-FAL COLORIMÉTRICO AO LONGO DO ENVELHECIMENTO DE OMI COM PAPEL CONVENCIONAL DE 7 A 240 DIAS

FONTE: O autor (2010).

A análise das FIGURAS 33 e 34 permite a constatação visível (pela presença da coloração roseada, BATISTA 2005) da presença de 2-FAL para o envelhecimento, a 100 °C, de, somente, o papel Kraft convencional, conforme já havia sido constatado pela técnica de HPLC.

Aliada a metodologia colorimétrica de análise da concentração de 2-FAL, foram obtidos os espectros de UV para cada uma das amostras em estudo, a partir dos quais foi possível verificar não só a presença e a variação da substância em ensaio, como também a formação de outros compostos resultantes da degradação térmica do OMI. Na FIGURA 35, está apresentada a sobreposição dos espectros de UV para o envelhecimento de papel termoestabilizado e, na FIGURA 36, para o papel convencional.

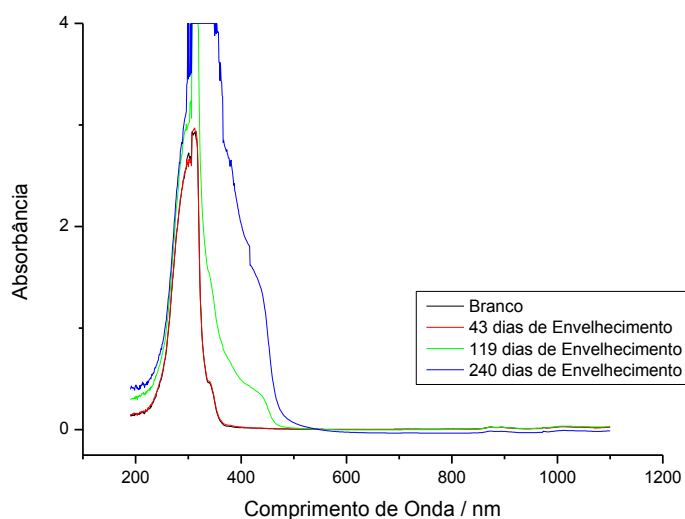


FIGURA 35 – SOBREPOSIÇÃO DOS ESPECTROS DE UV PARA O ENVELHECIMENTO DE ÓLEO E PAPEL TERMOESTABILIZADO SUBMETIDO A 100 °C.
FONTE: O autor (2010).

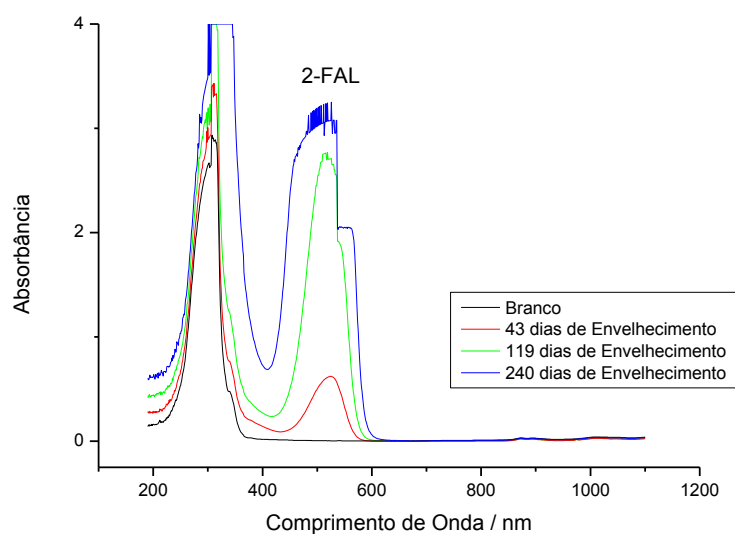


FIGURA 36 – SOBREPOSIÇÃO DOS ESPECTROS DE UV PARA O ENVELHECIMENTO DE ÓLEO E PAPEL CONVENCIONAL SUBMETIDO A 100 °C.
FONTE: O autor (2010).

De acordo com os espectros obtidos para ambos os tipos de papel Kraft isolante foi possível perceber a presença de dois picos principais, sendo o primeiro correspondente aos diversos compostos presentes em OMI e formados em função de seu envelhecimento e o segundo, referente ao 2-FAL, presente apenas para o papel convencional. A análise dos espectros obtidos permitiu, ainda, a verificação da presença de ruído no topo dos espectros de 2-FAL para as amostras mais envelhecidas comprova a hipótese de que não foi possível obter a real concentração

do composto em função de ultrapassar a saturação do método utilizado.

4.2.6 Ensaio Termogravimétrico de Óleo Mineral e Papel Isolante

A perda de massa em função da temperatura foi analisada para amostras de óleo novo e envelhecido por 240 dias a 100 °C, de modo a verificar diferenças das características em função da degradação do material. Os resultados obtidos estão apresentados no gráfico da FIGURA 37, no qual se notou a ausência de variações do comportamento entre amostras devido ao envelhecimento térmico.

Para o OMI novo e envelhecido, foi verificada uma perda de massa inicial, inferior a 1%, para a faixa de temperatura entre 90 e 110 °C, correspondente a umidade. Acima desta temperatura e até aproximadamente 300 °C ocorre a pirólise do material, sendo verificada massa residual inferior a 0,5% durante todo o restante do ensaio (até 850 °C).

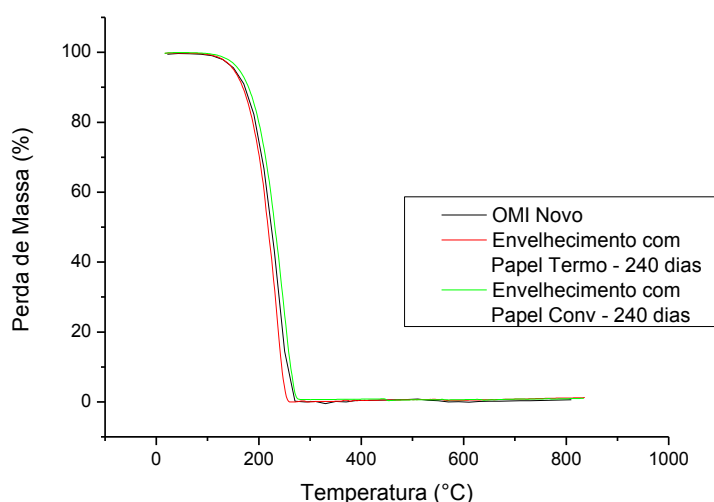


FIGURA 37 – CURVAS DE TG PARA AMOSTRAS DE OMI NOVO E ENVELHECIDO POR 240 DIAS A 100 °C, TANTO PARA PAPEL CONVENCIONAL, QUANTO TERMOESTABILIZADO.

FONTE: O autor (2010).

De forma semelhante ao OMI, a perda de massa em função da temperatura foi analisada para amostras de papel convencional e termoestabilizado ao longo do envelhecimento a 100 °C. Os resultados obtidos e apresentados no gráfico da FIGURA 38, não revelaram variações das curvas da TGA entre amostras, tanto

devido à degradação, quanto para os diferentes tipos de isolamento sólido.

Para ambas os tipos de papel, foi verificada uma perda de massa inicial, da ordem de 5%, para a faixa de temperatura entre 90 e 110 °C, correspondente a umidade. Acima desta temperatura e até, aproximadamente, 300 °C há uma tendência à estabilidade térmica, sendo a eliminação da matéria volátil, essencialmente, na faixa entre 300 e 380 °C. Os 20% de material sólido restantes foram decompostos, principalmente, em presença de atmosfera oxidativa, para temperaturas acima de 550 °C.

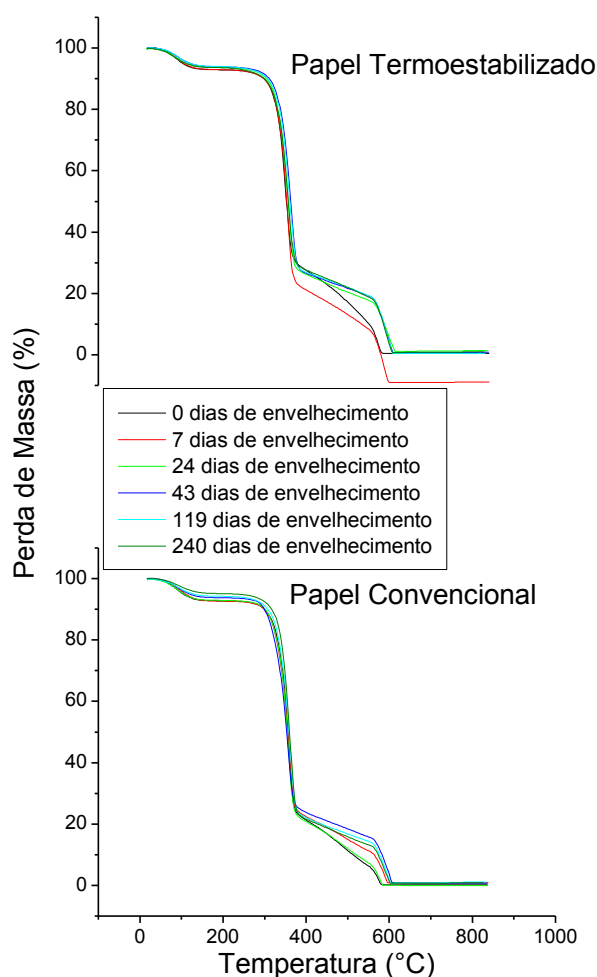


FIGURA 38 – CURVAS DE TG PARA AMOSTRAS DE PAPEL CONVENCIONAL E TERMOESTABILIZADO AO LONGO DO ENVELHECIMENTO A 100 °C.
FONTE: O autor (2010).

4.2.7 Grau de Polimerização do Papel Isolante

A degradação dos papéis submetidos ao estudo em questão foi verificada com o ensaio de GP em função do tempo de envelhecimento. Na FIGURA 39, está apresentado o gráfico dos resultados para o estudo desenvolvido a 100 °C e, na FIGURA 40, para 125 °C.

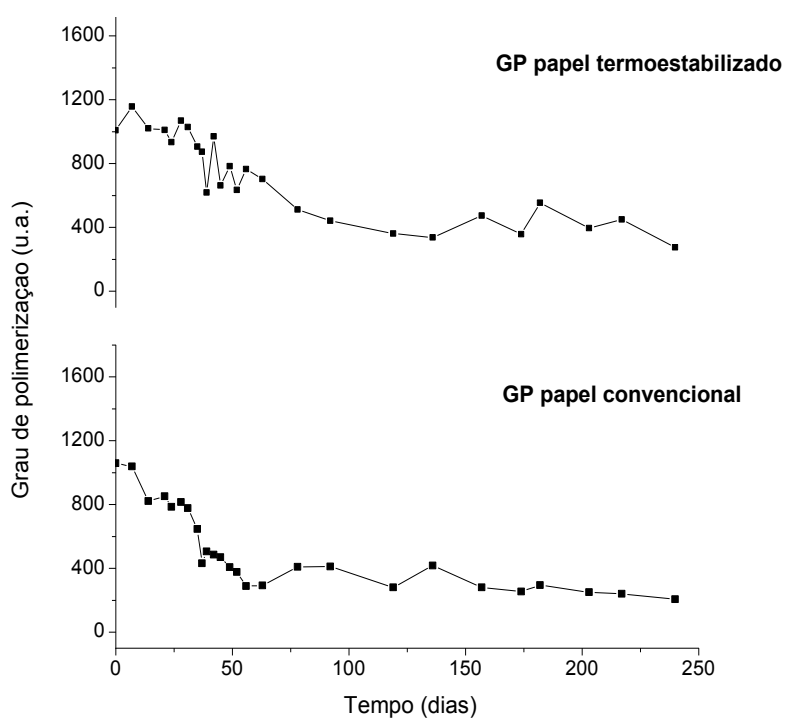


FIGURA 39 – VARIAÇÃO TEMPORAL DO GP DO PAPEL ENVELHECIDO A 100 °C.
FONTE: O autor (2010).

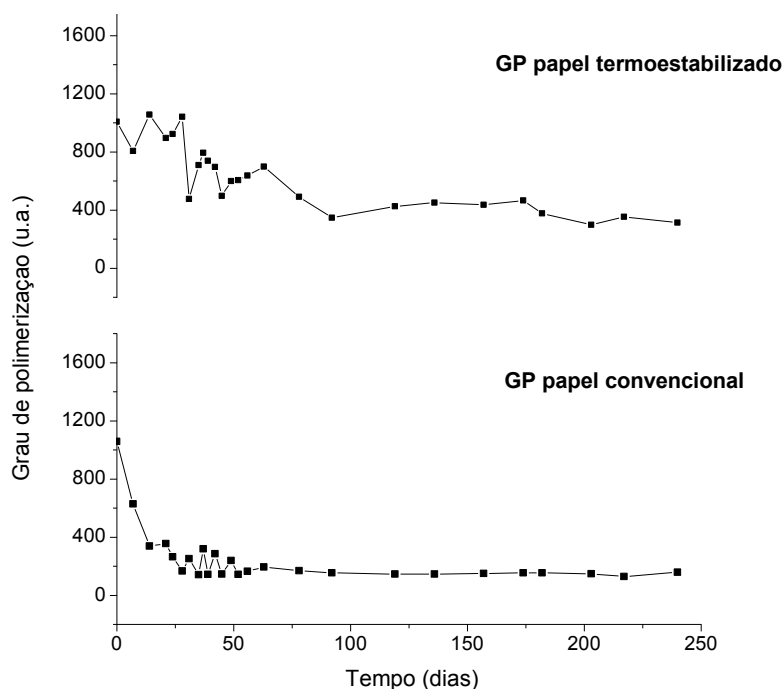


FIGURA 40 – VARIAÇÃO TEMPORAL DO GP DO PAPEL ENVELHECIDO A 125 °C.
FONTE: O autor (2010).

A análise dos resultados de GP comprovou a maior resistência do papel termoestabilizado em relação ao convencional, sendo notadas, para ambas as temperaturas, uma degradação inicial mais lenta e gradual, para o primeiro, e bastante semelhante ao decaimento exponencial para o segundo material em questão.

Comparativamente para as duas temperaturas em estudo, também foi possível verificar que a degradação do papel se deu de forma mais lenta para o início do envelhecimento a 100 °C, enquanto que para a temperatura de 125 °C a degradação, especialmente do papel convencional, apresentou um padrão mais abrupto e rápido.

Após os primeiros 100 dias de estudo, porém, todas as curvas (de 100 e 125 °C, para ambos os tipos de isolamento sólido) passaram a responder de maneira bastante semelhante, desenvolvendo um padrão gradual, até atingir os estágios de envelhecimento máximos do material, quando os resultados passaram a apresentar certa constância nos valores.

4.2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura do Papel Isolante

Para cada uma das amostras envelhecidas a 100 °C, por 7, 43, 119 e 240 dias, tanto para o papel Kraft termoestabilizado quanto o convencional, foram obtidas micrografias de uma área geral, com ampliação de 150x (FIGURA 41) e de 1000x (FIGURA 42).

Pela análise qualitativa das microscopias, notou-se que houve uma diminuição na densidade de fibras do material, com o aparecimento de espaços vazios, evidenciada pelas setas vermelhas na micrografia com ampliação de 1000x (FIGURA 42).

Comparativamente para os isolamentos sólidos convencional e termoestabilizado, foi possível perceber que o envelhecimento de ambos se deu de forma muito semelhante, não sendo possível inferir sobre a qualidade dos materiais, bem como sobre a velocidade de seu envelhecimento apenas pela análise das micrografias.

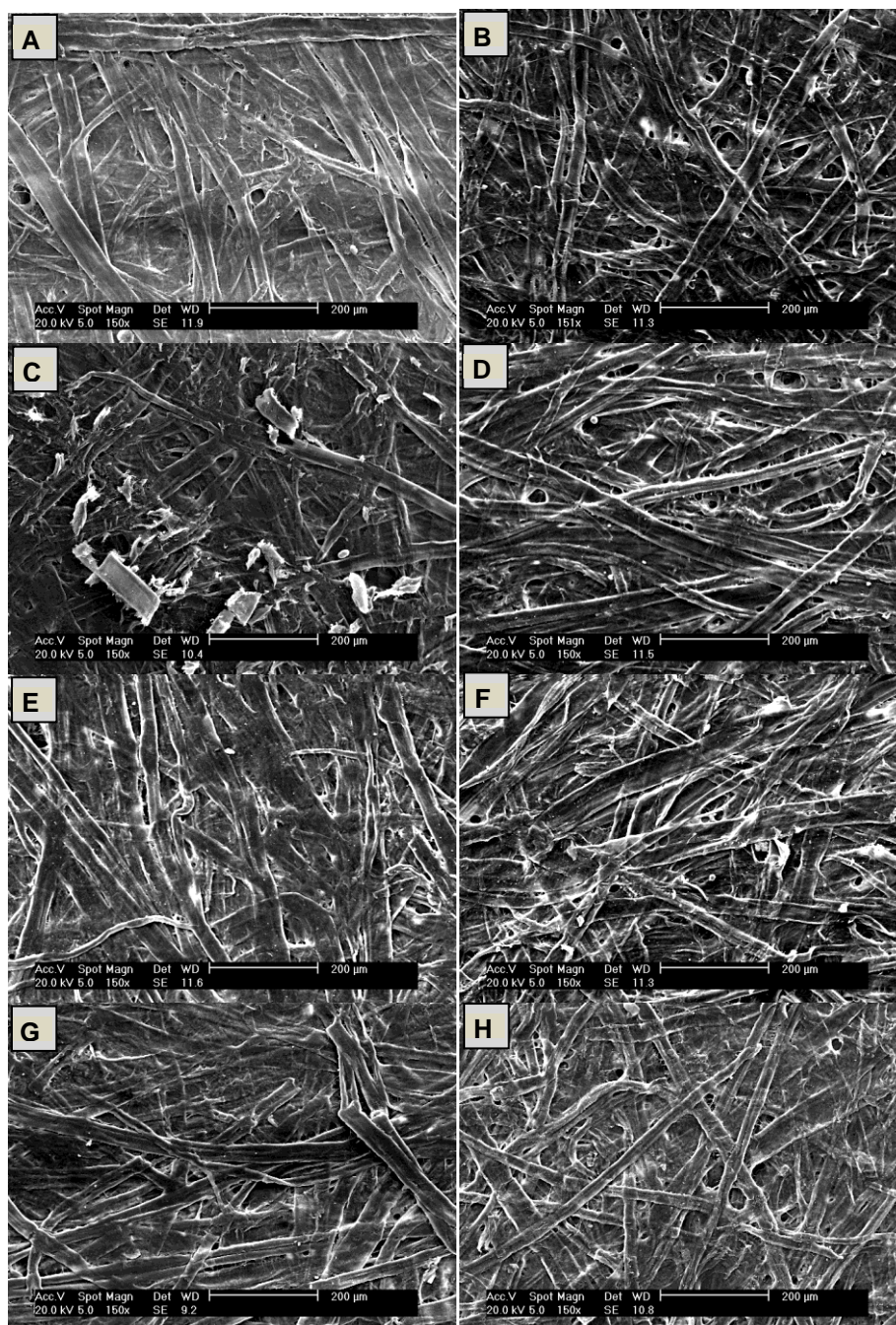


FIGURA 41 – ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DAS AMOSTRAS DE PAPEL PELA ANÁLISE DE MEV, COM AMPLIAÇÃO DE 150X, PARA PAPEL (A) CONVENCIONAL – 7 DIAS; (B) TERMOESTABILIZADO – 7 DIAS; (C) CONVENCIONAL – 43 DIAS; (D) TERMOESTABILIZADO – 43 DIAS; (E) CONVENCIONAL – 119 DIAS; (F) TERMOESTABILIZADO – 119 DIAS; (G) CONVENCIONAL – 240 DIAS; (H) TERMOESTABILIZADO – 240 DIAS.

FONTE: O autor (2010).

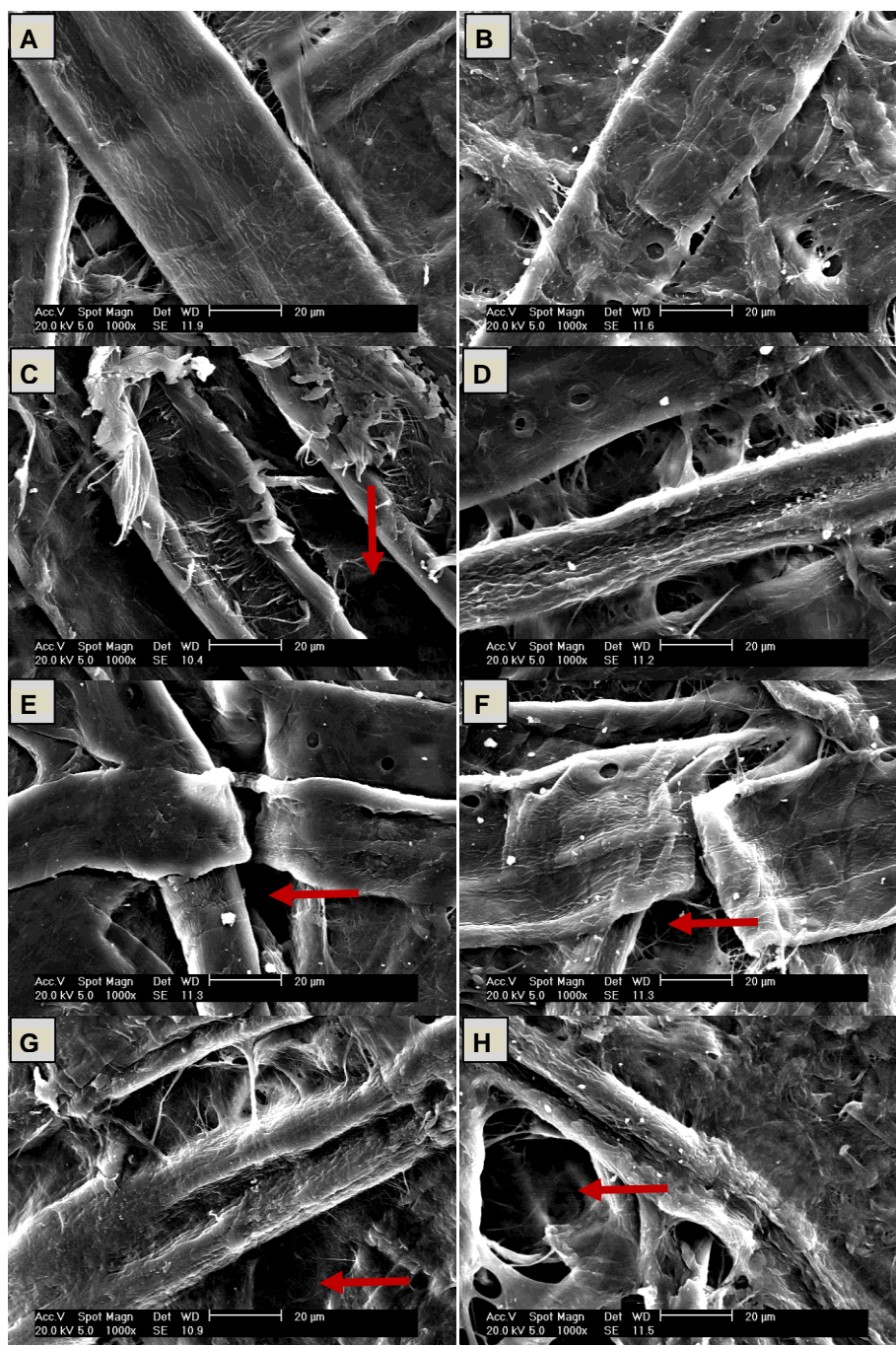


FIGURA 42 – ESTUDO DO ENVELHECIMENTO DAS AMOSTRAS DE PAPEL PELA ANÁLISE DE MEV, COM AMPLIAÇÃO DE 1000X, PARA FIBRAS DE PAPEL (A) CONVENCIONAL – 7 DIAS; (B) TERMOESTABILIZADO – 7 DIAS; (C) CONVENCIONAL – 43 DIAS; (D) TERMOESTABILIZADO – 43 DIAS; (E) CONVENCIONAL – 119 DIAS; (F) TERMOESTABILIZADO – 119 DIAS; (G) CONVENCIONAL – 240 DIAS; (H) TERMOESTABILIZADO – 240 DIAS.

FONTE: O autor (2010).

Juntamente com a obtenção das micrografias, foi realizada uma análise dos componentes do material a partir da técnica de EDS. Objetivou-se, com isso, evidenciar possíveis diferenças entre os dois tipos de isolamento sólido, bem como a variação das características para materiais em início e final de envelhecimento. Na FIGURA 43, estão apresentados os espectros de EDS para as amostras de papel termoestabilizado e convencional envelhecidas durante 7 dias e, na FIGURA 44, para aquelas submetidas a 240 dias de estresse térmico.

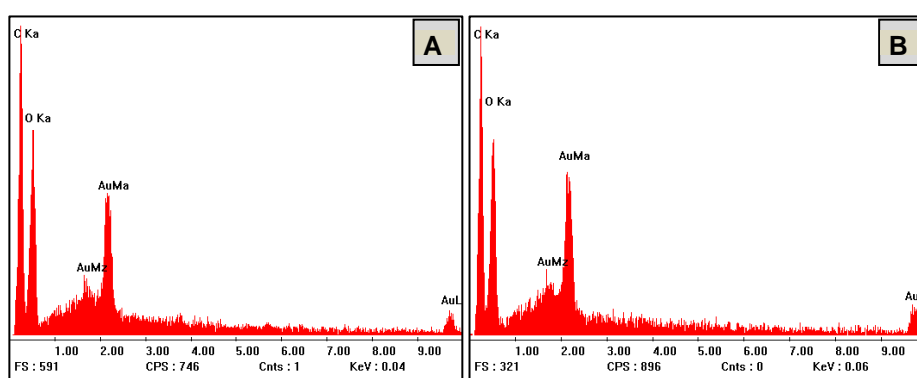


FIGURA 43 – ESPECTROS EDS PARA AMOSTRAS DE PAPEL CONVENCIONAL (A) E TERMOESTABILIZADO (B), ENVELHECIDAS AO LONGO DE 7 DIAS.
FONTE: O autor (2010).

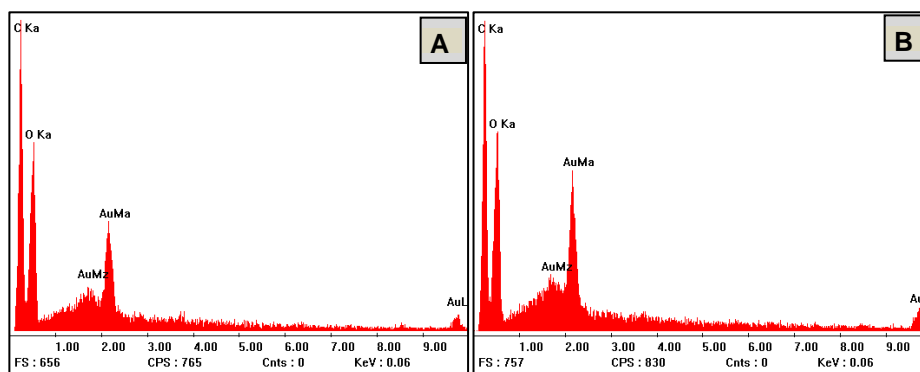


FIGURA 44 – ESPECTROS EDS PARA AMOSTRAS DE PAPEL CONVENCIONAL (A) E TERMOESTABILIZADO (B), ENVELHECIDAS AO LONGO DE 240 DIAS.
FONTE: O autor (2010).

Analisando os espectros obtidos para ambos os tipos de isolamento sólido e para os diferentes tempos de envelhecimento, notou-se a presença dos picos de carbono e oxigênio, típicos do material em questão, bem como a presença de ouro, o qual foi utilizado na metalização das amostras para análise. Não foi possível verificar alterações significativas que configurassem uma diferenciação tanto do

papel termoestabilizado em relação ao convencional, como quanto à degradação do material para diferentes tempos de estresse térmico.

4.2.9 Ensaios Mecânicos de Resistência à Tração do Papel

Os resultados obtidos de resistência à tração para ambos os tipos de isolamento sólida, em relação ao tempo de envelhecimento a 100 °C, estão apresentados na FIGURA 45. Por meio destes, foi verificada uma degradação mais acentuada do material convencional em relação ao termoestabilizado, especialmente, para envelhecimento a partir do quinquagésimo dia.

O papel Kraft convencional apresentou comportamento estável para o início do estudo, atingindo valores de, aproximadamente, 50% de perda da resistência à tração com o tempo de envelhecimento. Além disso, para a amostra sujeita há 240 dias, não foi possível a realização do ensaio uma vez que esta apresentou características friáveis e quebradiças à mão, não havendo possibilidade de colocá-la no equipamento de teste.

O isolamento sólido termoestabilizado, por sua vez, apresentou uma degradação mais uniforme e gradual ao longo do tempo de envelhecimento, não ultrapassando valores de 20% de perda da resistência mecânica à tração.

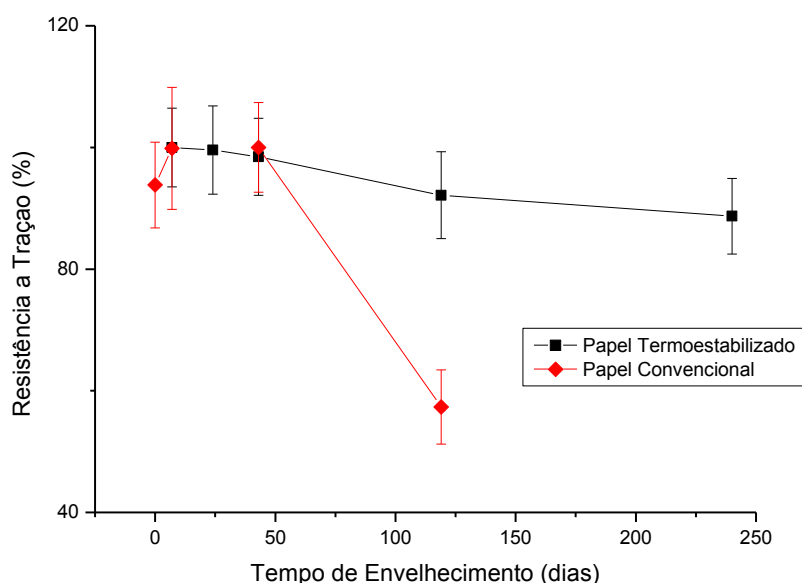


FIGURA 45 – GRÁFICO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO AO LONGO DO TEMPO DE ENVELHECIMENTO (A 100 °C), PARA PAPEL KRAFT CONVENCIONAL E TERMOESTABILIZADO.

FONTE: O autor (2010).

4.3 CORRELAÇÃO ENTRE A FORMAÇÃO DE COMPOSTOS FURÂNICOS E O DECAIMENTO DO GRAU DE POLIMERIZAÇÃO

A análise do OMI e dos papéis envelhecidos permitiram a evidência das alterações das características de ambos, quando submetidos ao estresse térmico. Neste sentido, os resultados obtidos propiciaram o desenvolvimento de um estudo comparativo da formação dos CF em óleo, frente à diminuição do GP do papel isolante, com a influência de diferentes tempos de envelhecimento e sob diferentes condições de temperatura. Nas FIGURAS 46 e 47 estão apresentadas as curvas de envelhecimento dos sistemas para a temperatura de 100 °C e nas FIGURAS 48 e 49, para a temperatura de 125 °C.

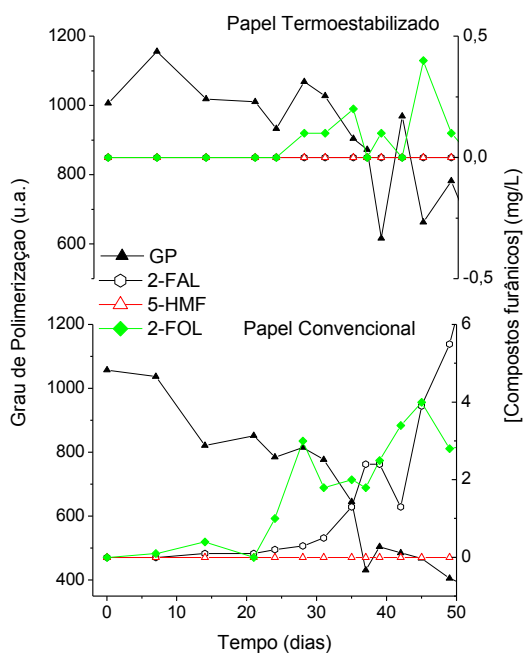


FIGURA 46 – CURVA DE ENVELHECIMENTO DO SISTEMA ÓLEO/PAPEL A 100 °C, DE 0 A 50 DIAS.
FONTE: O autor (2010).

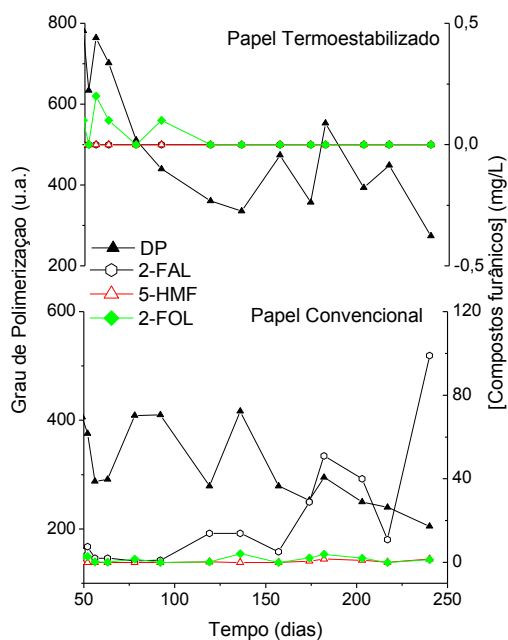


FIGURA 47 – CURVA DE ENVELHECIMENTO DO SISTEMA ÓLEO/PAPEL A 100 °C, DE 50 A 240 DIAS.
FONTE: O autor (2010).

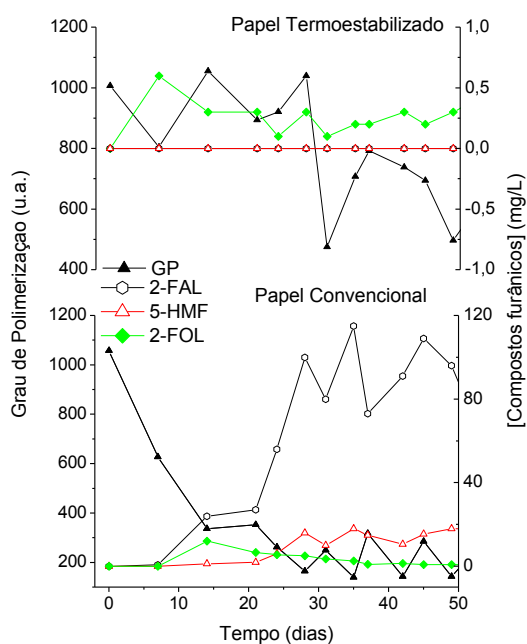


FIGURA 48 – CURVA DE ENVELHECIMENTO DO SISTEMA ÓLEO/PAPEL A 125 °C, DE 0 A 50 DIAS.
FONTE: O autor (2010).

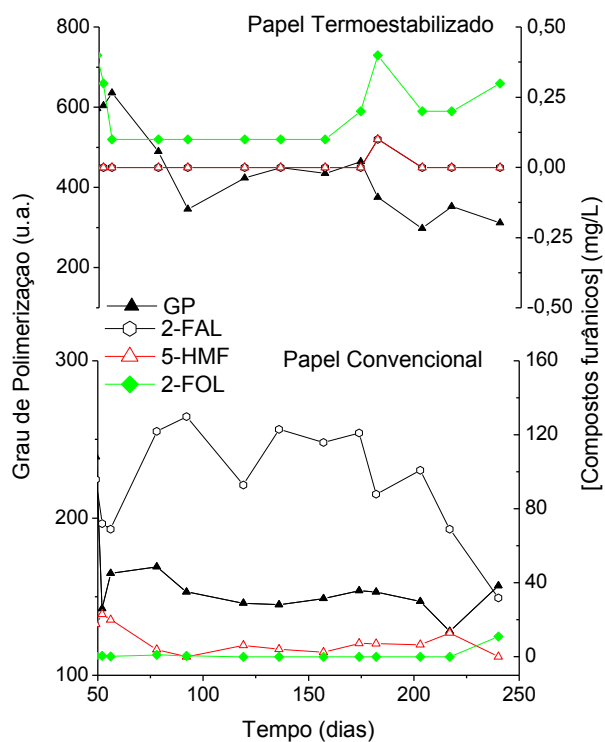


FIGURA 49 – CURVA DE ENVELHECIMENTO DO SISTEMA ÓLEO/PAPEL A 125 °C, DE 50 A 240 DIAS.
FONTE: O autor (2010).

Conforme foi possível notar pela análise das curvas de envelhecimento, a diminuição do GP do papel isolante aconteceu quase que simultaneamente com a formação de CF dissolvidos em OMI. Porém, para ambas as temperaturas, foi possível perceber que, para o papel termoestabilizado, não houve a formação de 2-FAL e 5-HMF, compostos mais utilizados na manutenção preventiva de transformadores. Mesmo para valores de GP na faixa nomeada como papel envelhecido pela norma NBR IEC 60450/2009 (ABNT, 2009), ou seja, abaixo de 350, houve apenas a formação do composto 2-FOL, identificado cromatograficamente. Esta substância apresentou uma evolução pouco gradual e estável, tendo picos de concentração para o início do envelhecimento térmico (de ambas as temperaturas), momento no qual a diminuição do GP foi mais significativa. Para valores de GP abaixo de 350, quando a curva de degradação do papel termoestabilizado (GP) apresentou certa constância, a formação de 2-FOL mostrou-se pequena ou inexistente.

Em contrapartida, para o papel Kraft convencional, paralelamente à rápida degradação do material, houve a formação e a dissolução em OMI de todos os 5 CF, com predomínio do 2-FAL. Para este, foram quantificadas concentrações bastante altas, obtendo resultados até superiores aos relatados na literatura como significativos para transformadores de potência (BASSETO FILHO, MACNUTT, & GRIFFIN, 1993; SETFORD, HEYWOOD, SAINI, & BOSWORTH, 2001) e em demais estudos de envelhecimento semelhantes (BATISTA, 2005). Analisando frente aos dados de GP do papel convencional e em comparação com os demais trabalhos desenvolvidos, é possível verificar que a obtenção de valores elevados para a concentração de 2-FAL está relacionada com uma degradação muito acentuada do papel convencional. Esta foi verificada a partir do momento em que os resultados de GP apresentaram valores inferiores a 350, quando é identificado um comportamento mais constante da curva de degradação do papel convencional. Sendo assim, verifica-se maior representatividade da realidade das concessionárias de energia para o envelhecimento de papel convencional até 50 dias, para a temperatura de 100 °C, e até 25 dias, para 125 °C.

5 CONCLUSÃO

No trabalho desenvolvido de envelhecimento térmico de sistemas contendo OMI, papel isolante e cobre, foi possível simular em laboratório os efeitos do estresse térmico aos quais os materiais internos de um transformador de potência estão sujeitos. Tanto para 100 °C quanto 125 °C houve a diminuição gradativa da tensão interfacial do fluido isolante, mantendo praticamente constantes os resultados de índice de neutralização e do fator de potência. Concluiu-se, a partir destes resultados, a verificação da degradação do OMI em estágios iniciais dos mecanismos de peroxidação, sem que houvesse a formação significativa de compostos polarizáveis e ácidos, responsáveis pela alteração dos valores dos últimos dois parâmetros.

Quanto ao isolamento sólido, a análise dos resultados obtidos comprovou a degradação do mesmo ao longo do envelhecimento térmico, bem como a maior resistência do papel termoestabilizado em relação ao convencional. Isto pôde ser comprovado com o decaimento do GP, mais rápido e acentuado para o segundo, e com a diminuição da resistência mecânica à tração, que não passou de 20% em relação à inicial para o isolamento termoestabilizado e ultrapassou os 50% para o convencional.

Paralelamente às análises de degradação do papel, o estudo desenvolvido permitiu identificar a formação de compostos indicadores de oxidação para OMI envelhecido com ambos os tipos de isolamento sólido.

Para o OMI envelhecido com papel convencional, houve a formação dos cinco compostos furânicos, com destaque para o 2-FAL, que foi encontrado em concentrações mais elevadas, superiores às aquelas relatadas na literatura como significativas para as concessionárias de energia. Uma vez que os resultados para GP também retrataram alta degradação do material sólido, concluiu-se a representatividade maior do estudo para os primeiros 50 dias do envelhecimento a 100 °C.

Já, para o envelhecimento de OMI com papel termoestabilizado, nos

cromatogramas foi identificado apenas um pico, com o tempo de retenção e espectro coincidentes com os obtidos para o padrão de referência do 2-FOL. O composto apresentou variação de sua concentração ao longo do estudo, porém de forma pouco gradual e em concentrações bastante inferiores ao identificado para 2-FAL no envelhecimento conduzido com papel convencional. Na análise das curvas de correlação entre a formação de indicadores em OMI e a degradação do papel, verificou-se, porém que a dissolução do composto se apresentou relacionada à diminuição do GP do isolamento sólido, em grande parte dos casos. Isto se mostrou interessante do ponto de vista da manutenção de equipamentos elétricos, uma vez que se concluiu a necessidade de verificação do tipo de papel isolante em uso antes da análise da formação de CF em decorrência da degradação do mesmo.

Por fim, buscou-se uma validação do estudo desenvolvido em laboratório, com a análise do OMI de transformadores de potência de subestações. Foram identificadas apenas algumas máquinas com variação das concentrações de 2-FAL e 5-HMF, não sendo verificada a presença de picos, nos cromatogramas, com tempo de retenção e espectro coincidentes com os obtidos para o padrão de referência do 2-FOL.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dando continuidade às pesquisas desenvolvidas nesta dissertação, recomenda-se o estudo e desenvolvimento de novas metodologias analíticas para CF em OMI, com foco na análise por detecção de massa de 2-FAL e 2-FOL.

Ainda, recomenda-se o estudo do envelhecimento do óleo vegetal isolante (OVI) com papéis Kraft termoestabilizado e convencional para investigação dos compostos de oxidação do isolamento sólido, já que o material se encontra em ascensão no mercado.

Recomenda-se também a exploração de demais parâmetros para estudo da degradação de óleo e papel ao longo da vida útil de transformadores de potência, como a formação de gases (a partir de técnicas cromatográficas) e ensaios dielétricos (polarização, espectroscopia de impedância, etc.).

Apesar da identificação de um parâmetro diferenciado para o acompanhamento da degradação do isolamento sólido termoestabilizado, estudos subseqüentes serão necessários de modo a buscar a validação da metodologia de manutenção com o acompanhamento de equipamentos elétricos isolados com o material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. (1992). ABNT NBR 8840:1992. Guia para amostragem de líquidos isolantes . Brasil: ABNT.

ABNT. (30 de 06 de 2004). NBR 14248. Produtos de Petróleo - Determinação do Número de Acidez e de Basicidade - Método do Indicador . Brasil.

ABNT. (30 de Maio de 2006). NBR 15349. Óleo Mineral Isolante - Determinação de 2-furfural e seus derivados. Brasil.

ABNT. (1965). NBR 6234. Óleo - Água - Determinação da Tensão Interfacial . Brasil.

ABNT. (2009). NBR IEC 60450:2009. Medição do Grau de Polimerização Viscosimétrico Médio de Materiais Celulósicos Novos e Envelhecidos para Isolação Elétrica . Brasil: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT. (1 de 12 de 1991). NBR12133. Líquidos isolantes elétricos - Determinação de fator de perdas dielétricas e da permissividade relativa (constante dielétrica) . Brasil.

ABU-ELANIEN, A., & SALAMA, M. (05 de Novembro de 2009). Asset management techniques for transformers. Eletric Power Systems Research , pp. 456-464.

ANEEL. (2008). Relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica - 10 anos. Brasília: CDU.

ANEEL. (2010). Relatório da Agência Nacional de Energia Elétrica 2009. Brasília: CDU.

ASTM. (1993). ASTM E 1131/1993. Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry . Estados Unidos da América: ASTM.

ASTM. (2002). ASTM E 1252/1998 . Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis .

BARRETO JR, J. T., PESENTI, G. R., & CHAVES, J. A. (1999). Influência da Manutenção do Óleo Isolante de Transformadores de Potência sobre as Concentrações de Furanos (2-FAL). CIGRÈ .

BASSETO FILHO, A., MACNUTT, W., & GRIFFIN, P. (Outubro de 1993). Grupo Bueno & Mak. Acesso em junho de 2010, disponível em Publicações - Curso Tutorial sobre Papéis Isolantes Elétricos de Transformadores: http://www.buenomak.com.br/publicacoes/pdf/ISOLACAO-1993_tutorial_papeis_isolantes_trafo.pdf

BATISTA, D. A. (2005). Desenvolvimento de Metodologia Colorimétrica para Dosagem de Compostos Furânicos em Óleo Mineral Isolante. Curitiba: UFPR.

BATISTA, D. A., PATRIARCA, P. A., CASTANHO, C. F., WILHELM, H. M., TRINDADE, E. M., BEZERRA, A. N., et al. (16-21 de Outubro de 2005). Desenvolvimento e Validação de Técnica para Manutenção Preditiva do Papel Isolante em Transformadores de Potência. Anais do XVIII Seminário de Produção e Transmissão de Energia Elétrica . Curitiba, Paraná, Brasil.

BATISTA, D. A., PATRIARCA, P. A., TRINDADE, E. M., & WILHELM, H. (2007). Colorimetric Methodology for Monitoring the Cellulose Insulating Paper Degradation in Electrical Equipments Filled with Mineral Oil . Cellulose .

BRASIL, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (08 de dezembro de 2008). ANP N° 36/2008. Resolução da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis n° 36 de 2008 . Brasil.

DERVOS, C. T., PARASKEVAS, C. D., SKAFIDAS, P., & STEFANO, N. (2005). Dielectric Spectroscopy and Gas Chromatography Methods Applied on High-Voltage Transformer Oils. IEEE .

DIOGO, A. C. (outubro de 1997). Avaliação da Vida Útil de Transformadores por Cromatografia Líquida. Anais do XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica . Belém, Pará, Brasil.

DU, Y., ZAHN, M., LESIEUTRE, B. C., MAMISHEV, A. V., & LINDGREN, S. R. (Janeiro-Fevereiro de 1999). Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems. IEEE , pp. 11-20.

FERNANDES, P. (Janeiro de 1991). Controle de Óleo Mineral em Transformadores. Mundo Elétrico , 40-45.

FERNANDES, P. O. (1988). Apostila: Manutenção de transformadores através do controle do óleo isolante mineral: notas de aula do curso de manutenção de transformadores. 17p. Westinghouse do Brasil – Divisão de Serviços Industriais. .

FROTA, A. S. (1985). Óleos Isolantes - Resultados Práticos. Revista Tecnologia .

GUEIBER, D.; LIMA, I.A.; OLIVEIRA, I.L.; ROMANO, C.A.; STADLER, C.C.; THOMAZ, M.S. (19__). Aspectos sobre Responsabilidade Ambiental e Tratamento de Resíduos de Óleo Isolante Mineral em uma Empresa da Energia Elétrica no Sul do Brasil: um estudo de caso. Anais do IX Simpósio Internacional Processo Civilizador, Tecnologia e Civilização. Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

JUNG, J. W., & JUNG, J. S. (21-24 de Abril de 2008). The Effect of Thermal Ageing on the Electrical Characteristics of Insulating Oil for Pole Transformers. Anais da Conferência Internacional de Monitoramento e Diagnóstico . Pequim, China.

KOHTOH, M., KANEKO, S., OKABE, S., & AMIMOTO, T. (2009). Aging Effect on Electrical Characteristics of Insulating Oil in Field Transformers. IEEE , 1698-1706.

LACTEC. (1991). Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - Apostila de óleos minerais isolantes. . Curitiba, Paraná, Brasil: Laboratório de Óleo Mineral Isolante - Departamento de Materiais Orgânicos do LACTEC.

LANDUCCI JR, A. (2009). Manutenção Pré-Corretiva em Transformadores de Potência - Um novo conceito de Manutenção. Tese de Doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo . São Carlos, São Paulo, Brasil: USP.

LEWAND, L. B. (2006). Practical Experience Gained from Furanic Compound Analysis. Anais da 73° Annual International Double Client Conference .

LIPSTEIN, R. A., & SHAKNOVICH, M. I. (1970). Transformer Oil (2. Ed. ed.). Jerusalem, Israel.

LÜTKE, H., HÖHLEIN, I., & KACHLER, A. J. (2002). Transformer Ageing Research on Furanic Compounds. CIGRÈ .

MAK, J., BASSETO FILHO, A., & AITA, S. (1995). Vida Útil de Transformadores de Potência: Como dobrar para 60 anos. Anais do 1º Seminário Nacional de Manutenção no Setor Elétrico . Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.

MARTINS, M. A. (2007). Furfuraldeído - Um Indicador Prático da Degradação Térmica do Papel Kraft de Transformadores. Ciência e Tecnologia de Materiais , 19, 25-33.

MARTINS, M. A. (2007). Monitorização da degradação térmica do papel isolante usado em transformadores: Papel "Thermally Upgraded" Versus Papel Kraft. Ciência e Tecnologia dos Materiais , 19, 14-18.

MILASH, M. (1984). Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante. Edgard Blücher Ltda.

MYERS, S. D., KELLY, J., & PARRISH, R. (1982.). A guide to transformer maintenance. Ohio.: Transformer Maintenance Institute.

NUNES JR, J. L., & DIOGO, A. C. (19_). Grupo Bueno & Mak. Acesso em Janeiro de 2010, disponível em Publicação Bueno & Mak - Diagnose do Estado da Isolação Sólida de Transformadores através do Ensaio de Índice de Polarização: http://www.buenomak.com.br/publicacoes/pdf/ISOLACAO-diagnose_estado_isolacao.pdf

OKABE, S., KANEKO, S., KOHTOH, M., & AMIMOTO, T. (13 de Agosto de 2009). Analysis Results for Insulating Oil Components in Field Transformers. IEEE , pp. 302-311.

OKABE, S., KOHTOH, M., TSUCHIE, M., & AMIMOTO, T. (5 de Abril de 2009). Influence of Diverse Compounds on Eletrostatic Charging Tendency of Mineral Insulating Oil used for Power Transformer Insulation. IEEE , pp. 900-908.

OLIVEIRA, T. F., QUEIROZ, J. C., SARAIVA, A. C., & MOURA, H. P. (2005). Utilização de Spline na Avaliação do Aditivo Antioxidante DBPC em Óleo Isolante. *Revista de Matemática e Estatística*, 7-18.

PAHLAVANPOUR, B., & PABLO, A. (dezembro de 1997). Furanic Compounds Analysis: A tool for predictive maintenance of oil filled electrical equipment. ELECTRA , pp. 9-31.

QUADROS, A. M. (março de 2006). Papel Nomex Utilizado em Transformadores: Avaliação das Características e Degradação Térmica. Dissertação de Mestrado submetida à Universidade Federal de Santa Catarina . Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

SÁ, A. L., & NEPOMUCENO, P. R. (1997). Avaliação do Grau de Polimerização Antes e Após a Secagem de Transformadores em Fábrica. Anais do XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica . Belém, Pará, Brasil.

SAMISTRADO, G., MUNIZ, G. I., de PERALTA-ZAMORA, P., & CORDEIRO, G. A. (2009). Previsão das Propriedades Físicas do Papel Kraft por Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR) e Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS). *Química Nova*, 32 (6).

SCARDAZZI, A. (23 a 27 de Abril de 2007). Ferramentas para Monitoramento da Vida Útil de Transformadores. 24ª Feira Internacional da indústria Elétrica, Energia e Automação. São Paulo, São Paulo, Brasil.

SETFORD, S., HEYWOOD, R., SAINI, S., & BOSWORTH, T. (29 de agosto de 2001). Pulsed amperometric detection of furan compounds in transformer oil. *Analytica Chimica Acta* , pp. 253-261.

STORELLI, L. (20_). Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná - Professor Fernando Piazza. Acesso em abril de 2009, disponível em Artigo Papel Termoestabilizado: www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/LucianoStorelli.pdf

TIMOSHKIN, I. V., GIVEN, M. J., WILSON, M. P., & MACGREGOR, S. J. (2009). Review of Dielectric Behaviour of Insulating Liquids. IEEE .

TULIO, L. (2008). Estudo do Envelhecimento Acelerado do Óleo Vegetal Isolante em Escala Laboratorial. Curitiba: PRODETEC.

VASCONCELOS, V., ALVES, M. E., & MOURA, G. A. (Setembro de 2008). Monitoramento da Umidade no Óleo Isolante de Transformadores de Potência Visando o Aumento da Confiabilidade Operativa. Anais do Congresso Latino-Americano de Distribuição de Energia Elétrica . Mar del Plata, Argentina.

WEG Equipamentos Elétricos S.A. (s.d.). WEG Produtos e Serviços. Acesso em 4 de março de 2010, disponível em Manual de Instalação e Manutenção para Transformadores a Óleo: <http://www.weg.net/files/products/WEG-transformadores-a-oleo-instalacao-e-manutencao-751-manual-portugues-br.pdf>

WHO. (1982). World Health Organization - International Programme on Chemical Safety (IPCS) - Selected petroleum products. Environmental Health Criteria , 20 . Geneva.

WYKROTA, R. (2004). Poliestireno-divinil benzeno funcionalizado na regeneração de óleo mineral isolante envelhecido: remoção de produtos de oxidação. . Dissertação de Mestrado - Laboratório de Polímeros Sintéticos do Departamento de Química da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, Brasil: UFPR.

ZHANG, C. H., & MACALPINE, J. M. (2006). Furfural Concentration in Transformer Oil as an Indicator of Paper Ageing: Field Measurements. Anais da Exposição e Conferência IEEE de Transmissão e Distribuição da América Latina . Venezuela.

ZIRBES, R., ROLIM, J. G., & ZÜRN, M. (2005). Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado Real de Isolamentos de Papel Impregnado com Óleo Mineral. Revista Controle e Automação , 318-331.

ANEXO

HISTÓRICO DE MANUTENÇÃO DOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS AMOSTRADOS

0 a 1 ano de Operação			
1A	Botucatu (33)	Início de Operação:	Out. 2009
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
set/09	44	0,01	0,12
mai/10	44,3	0,01	0,14
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
mai/10	0	0	0
1 a 5 anos de Operação			
1B	Bom Jardim (57)	Início de Operação:	Set. 2006
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
mai/06	47	0,01	0,2
set/06	47	0,01	0,3
jun/07	46	0,01	--
set/09	46	0,01	--
fev/10	46	0,01	--
mai/10	48,5	0,01	0,27
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
mai/08	0	0	0
jun/08	0,37	0	--
mai/10	0	0	0

2B	Bom Jardim (59)	Início de Operação:	Set. 2006
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
set/06	47	0,01	0,2
set/08	47	0,01	--
mai/10	46,9	0,01	0,43
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
set/08	0	0	--
mai/10	0	0	0
3B	Bom Jardim (61)	Início de Operação:	Set. 2006
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
set/06	47	0,01	0,2
set/08	46,5	0,01	--
fev/10	45	0,01	--
mai/10	46,6	0,01	0,34
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
set/08	0	0	--
mai/10	0	0	0
5 a 10 anos de Operação			
1C	Botucatu (29)	Início de Operação:	Mar. 2006
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
mar/06	48	0,01	0
fev/07	46	0,01	0
set/09	46	0,01	--
mai/10	44,7	0,01	0,33
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
abr/08	0,01	0	0
mai/10	0	0	0

2C	Botucatu (31)	Início de Operação:	Mai. 2006
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
out/07	48	0,01	--
out/08	48	0,01	0,4
set/09	46	0,01	0,2
mai/10	45,8	0,01	0,35
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
abr/08	0	0	0
mai/10	0	0	0
3C	Cabreuva (47)	Início de Operação:	Jun. 2004
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
jun/04	41	0,01	0,4
jul/05	41	0,01	0,2
ago/06	41	0,01	0
fev/09	41	0,01	--
fev/10	41	0,01	--
mai/10	40,8	0,01	0,33
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
jun/05	0	0	--
jul/08	0,15	0	--
fev/09	0	0	--
mai/10	0	0	0

4C	Cabreuva (45)	Início de Operação:	Jun.2004
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
jun/04	41	0,01	0,4
jul/07	40	0,01	0,4
ago/06	39	0,01	0
fev/09	39	0,01	--
fev/10	39	0,01	--
mar/10	39	0,01	--
mai/10	38,7	0,01	0,25
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
jun/05	0	0	--
jul/08	0,08	0	--
fev/09	0	0	--
mai/10	0	0	0
5C	Cabreuva (49)	Início de Operação:	Jun.2004
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
jun/04	41	0,01	0,4
jul/05	40	0,01	0,2
ago/06	40	0,01	0
fev/09	40	0,01	--
fev/10	40	0,01	--
mai/10	40,5	0,01	0,21
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
jun/05	0,01	0	--
jul/08	0,05	0	--
fev/09	0	0	--
mai/10	0	0	0

6C	Sumaré (15)	Início de Operação:	Jun.2002 / Out.2005
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
abr/03	40	0,01	0,65
jul/03	41	0,01	0
nov/03	41	0,01	0
mai/04	41	0,01	0
jun/05	41	0,01	0
out/05	Passivação de OMI		
out/05	41	0,01	--
jul/06	38	0,01	--
jun/07	38	0,01	--
jun/08	38	0,01	--
jun/09	38	0,01	--
jan/10	38	0,01	--
mai/10	41,5	0,01	0,18
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
abr/03	0	0	0
jun/05	0	0	0
out/05	Passivação de OMI		
jan/10	0	0	--
mai/10	0	0	0
7C	Sumaré (13)	Início de Operação:	Jun.2002 / Out.2005
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
abr/03	41	0,01	--
jul/03	41	0,01	--
mai/03	41	0,01	0,2
jun/05	41	0,01	0,7
out/05	Passivação de OMI		
out/05	41	0,01	0,2
jul/06	41	0,01	0,2
jun/07	39	0,01	0,2
jun/08	39	0,01	0,2
jun/09	39	0,01	0,2
jan/10	39	0,01	0,18
mai/10	43,9	0,01	0,21

Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
abr/03	0	0	--
jun/05	0	0	--
jan/10	0	0	--
mai/10	0	0	0
8C	Sumaré (11)	Início de Operação:	Jun.2002 / Out.2005
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
ago/03	40,5	0,01	--
dez/03	41	0,01	--
mai/04	41	0,01	0,26
jun/04	41	0,01	0,26
jun/05	41	0,01	0,4
out/05	Passivação de OMI		
out/05	41	0,01	0,3
jul/06	39	0,01	0,3
mar/07	40	0,01	0,3
jun/07	39	0,01	0,2
jun/08	39	0,01	0,2
jun/09	39	0,01	0,2
jan/10	38	0,01	0,2
mai/10	42,9	0,01	0,21
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
abr/03	0	0	--
jun/05	0	0	--
jan/10	0	0	--
mai/10	0	0	0

10 a 15 anos de Operação			
1D	Embú-Guaçú (17)	Início de Operação:	Out.1996
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
out/95	41,5	0,01	--
mar/96	40,5	0,01	--
jan/97	40,5	0,01	--
fev/03	40	0,01	--
mar/04	40	0,01	0,14
mar/05	40	0,01	0,1
out/06	40	0,01	0,8
out/07	40	0,01	--
dez/08	40	0,01	0,14
set/09	40	0,01	0,25
mai/10	43,1	0,01	0,15
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
mar/96	--	0,003	--
jan/03	0,04	0,04	--
fev/03	0,017	0,011	--
mar/05	0	0	--
set/09	0	0	--
mai/10	0,1	0	0
2D	Embú-Guaçú (19)	Início de Operação:	Out.1996
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
jan/97	41	0,01	--
jun/97	40,5	0,01	--
fev/03	40	0,01	--
mar/04	45	0,01	0,11
mar/05	40	0,01	0,1
out/06	40	0,01	0,5
out/07	40	0,01	--
dez/08	40	0,01	0,13
set/09	40	0,01	0,14
mai/10	42,7	0,01	0,19

Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
jan/03	0,01	0	--
fev/03	0	0	--
mar/05	0	0	--
set/09	0	0	--
mai/10	0	0	0
3D	Embú-Guaçú (21)	Início de Operação:	Out.1996
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
jan/97	41	0,01	--
jun/97	41	0,01	--
fev/03	40	0,01	--
mar/04	40	0,01	0,19
mar/05	40	0,01	0,1
out/06	40	0,01	0,3
out/07	40	0,01	--
dez/08	40	0,01	0,11
set/09	40	0,01	0,18
mai/10	42,4	0,01	0,13
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
jan/03	0,01	0	--
fev/03	0	0	--
mar/05	0	0	--
set/09	0	0	--
mai/10	0	0	0
4D	Oeste (7)	Início de Operação:	Nov.2000
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
abr/01	43	0,01	0,18
jan/03	43	0,01	0,2
set/04	45	0,01	0,2
nov/05	44	0,01	0,3
jan/07	43	0,01	0,1
dez/09	43	0,01	0,2
mai/10	46,3	0,01	0,31

Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
jan/03	0	0	--
nov/05	0	0	--
jan/08	0,01	0	0
mar/08	0,01	0	0
mai/10	0	0	0
5D	Oeste (9)	Início de Operação:	Nov.2000
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
abr/01	44	0,01	0,11
jan/03	41	0,01	0,2
set/04	45	0,01	0,2
nov/05	45	0,01	0,4
jan/07	45	0,01	0,2
dez/09	44	0,01	0,22
mai/10	44,5	0,01	0,5
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
jan/03	0	0	--
nov/05	0	0	--
mar/08	0,01	0	0
mai/10	0	0	0
6D	Porto Ferreira (1)	Início de Operação:	Mai.1999
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
mai/10	45,5	0,01	0,38

Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
mai/99	0,001	0,007	--
set/01	0,011	0	--
mai/04	0	0	--
jan/07	0	0	--
mai/10	0	0	0

Superior a 15 anos de Operação			
1E	Mogi Mirim III (25)	Início de Operação:	Set.1991

Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
abr/99	36	--	--
mai/00	34,5	0,02	--
mai/01	34	0,02	--
ago/02	34	0,02	--
ago/03	34	0,02	--
ago/04	34	0,01	0,4
ago/05	33	0,01	0,4
ago/06	33	0,01	0,4
ago/07	33	0,01	--
set/08	33	0,01	0,3
abr/09	33	0,01	0,4
mar/10	33	--	--
mai/10	37,5	0,02	0,55

Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
nov/93	0,023	0	0
abr/97	0,055	0	0
out/99	0,049	0,001	--
mai/01	0,038	0	--
ago/03	0,04	0	--
ago/05	0,03	0	--
out/09	0	0	--
mai/10	0	0	0

2E	Mogi Mirim III (23)	Início de Operação:	Set.1991
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
abr/99	37	--	--
mai/00	33	0,02	--
mai/01	33	0,02	--
ago/02	33	0,02	--
ago/03	--	0,02	--
ago/04	--	0,01	0,8
ago/05	33	0,01	0,6
ago/06	33	0,01	0,8
ago/07	33	0,01	--
set/08	33	0,01	0,8
abr/09	33	0,02	0,7
mar/10	33	--	--
mai/10	37,2	0,01	1,5
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
nov/93	0,09	0,002	0
abr/97	0,067	0,001	0
out/99	0,061	0,001	--
mai/01	0,053	0	--
ago/03	0,06	0	--
ago/05	0,05	0	--
nov/09	0,03	0	--
mai/10	0	0	0

3E	Mogi Mirim III (27)	Início de Operação:	Set.1991
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
abr/99	36	--	--
mai/00	33	0,01	--
mai/01	36	0,01	--
ago/02	36	0,01	--
ago/03	35	0,01	--
ago/04	37	0,01	0,5
ago/05	37	0,01	0,4
ago/06	37	0,01	0,4
ago/07	37	0,01	--
set/08	37	0,01	0,4
abr/09	37	0,01	0,4
mar/10	36	--	--
mai/10	38,9	0,02	0,93
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
nov/93	0,048	0,003	0
abr/97	0,066	0	0
out/99	0,067	--	--
mai/01	0,046	0	--
ago/03	0,06	0	--
ago/05	0,05	0	--
out/09	0,03	0	--
mai/10	0	0	0

4E	Bom Jardim (53)	Início de Operação:	Mai.1983 / Dez.1985
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
jul/96	32	0,01	--
jul/97	32,5	0,01	--
set/98	32,5	0,01	--
ago/99	32,5	0,01	--
ago/00	33	0,01	--
nov/01	33	0,01	--
dez/02	32	0,01	--
jul/04	35	0,01	0,6
set/05	35	0,01	0,4
fev/07	35	0,01	0,7
jul/09	35	0,01	0,38
mai/10	37,6	0,01	0,51
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
fev/95	0,047	0,001	--
set/98	0,016	0,001	--
nov/01	0	0,008	--
dez/03	0,01	0	--
abr/06	0,018	0	--
mai/10	0	0	0
5E	Bom Jardim (55)	Início de Operação:	Mai.1983 / Out.1986
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
jul/97	34	0,01	--
set/98	34	0,01	--
ago/99	34	0,01	--
ago/00	34	0,01	--
nov/01	34	0,01	--
dez/02	34	0,01	--
ago/03	34	0,01	--
jul/04	34	0,01	0,4
set/05	34	0,01	0,3
fev/07	34	0,01	0,4
fev/10	34	0,01	0,34
mai/10	39,1	0,01	1,3

Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
fev/05	0,02	--	--
set/98	0,023	--	--
nov/01	0	0	--
dez/03	0,01	0	--
abr/06	0,011	0	--
mai/10	0	0	0
6E	Bom Jardim (51)	Início de Operação:	Mai.1983 / Ago.2003
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
jul/96	34	0,01	--
jul/97	34	0,01	--
set/98	34	0,01	--
ago/99	34	0,01	--
ago/00	34	0,01	--
nov/01	34	0,01	--
jan/03	34	0,01	--
ago/03	34	0,01	--
jul/04	34	0,01	0,3
set/05	34	0,01	0,3
fev/07	34	0,01	0,4
mai/10	37,7	0,01	1
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
fev/95	0,024	--	--
set/98	0,014	0,003	--
nov/01	0	0	--
dez/03	0	0	--
abr/06	0,011	0	--
mai/10	0	0	0

7E	Cabreuva (43)	Início de Operação:	Mai.1978 / Jun.1994
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
dez/94	37	0,01	--
jul/95	36,5	0,01	--
jun/96	36,5	0,01	--
abr/97	34,5	0,01	--
fev/98	34,5	0,01	--
mai/00	28	0,01	--
out/01	28	0,01	--
dez/02	28	0,01	--
abr/04	28	0,01	1,34
jun/06	26	0,01	1,2
jun/07	26	0,01	1,3
set/08	26	0,03	--
mai/10	27,5	0,01	2
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
fev/93	0,036	--	--
dez/94	0,022	--	--
jun/96	0,038	--	--
out/96	0,031	--	--
fev/98	0,048	0,002	--
mai/00	0,054	0,003	--
mai/02	0,083	0	--
ago/06	0,09	0	--
ago/08	0,05	0	--
set/08	0,03	0	--
ago/09	0,03	0	--
mai/10	0	0	0

8E	Cabreuva (39)	Início de Operação:	Mai.1978 / Mar.1993
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
out/95	33,5	0,01	--
jun/96	33,5	0,01	--
abr/97	34	0,01	--
fev/98	34	0,01	--
mai/00	28,5	0,01	--
out/01	28,5	0,01	--
dez/02	28	0,01	--
abr/04	28	0,02	1,34
jun/05	28	0,02	3,1
out/07	28	0,02	--
ago/09	28	0,02	1,79
mai/10	27,3	0,01	2,6
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
fev/93	0,08	--	--
mar/93	0,084	--	--
out/95	0,117	--	--
jun/96	0,121	0,002	--
out/96	0,11	--	--
fev/98	0,123	0,001	--
mai/00	0,117	0,003	--
mar/02	0,107	0	--
ago/06	0,12	0	--
set/08	0,04	0	--
set/08	0,14	0	--
mai/10	0	0	0

9E	Cabreuva (41)	Início de Operação:	Mai.1978 / Nov. 1993
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
jun/94	39,5	0,01	--
jun/96	37,5	0,01	--
abr/97	36	0,01	--
fev/98	36	0,01	--
mai/00	28,5	0,02	--
out/01	28	0,02	--
dez/02	28	0,02	--
abr/04	28	0,02	0,96
out/05	27	0,02	1
jun/07	27	0,02	1
ago/08	27	0,03	1,2
ago/09	27	0,03	1,18
mai/10	25,2	0,01	1,3
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
fev/93	0,013	--	--
jun/96	0,021	--	--
out/96	0,026	--	--
fev/98	0,029	--	--
mai/00	0,031	0	--
mar/02	0,056	0,007	--
nov/05	0,04	0	--
ago/06	0	0	--
set/08	0,02	0	--
set/08	0,04	0	--
mai/10	0	0	0

10E	Casa Branca (3)	Início de Operação:	Out.1979 / Nov. 1999
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
jan/94	18	0,08	--
abr/94	18	0,09	--
abr/97	18	0,09	--
abr/99	18	0,09	--
nov/99	Regeneração ou Troca do OMI		
nov/99	41	0,01	--
set/01	33	0,01	--
nov/03	32	0,01	--
jul/05	31	0,01	2,1
jul/06	29	0,02	2
jul/07	29	0,02	2,1
ago/08	27	0,02	--
nov/09	27	0,02	2,3
mai/10	29,5	0,02	3,2
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
fev/93	--	0,017	--
jan/94	0,31	0,03	--
jan/95	0,408	0,043	--
abr/97	0,888	0,062	--
abr/99	1,328	0,099	--
nov/99	Regeneração ou Troca do OMI		
set/01	0,569	0,037	--
abr/04	1,1	0,03	--
jan/07	0,85	0,03	--
nov/09	1,61	0,06	--
mai/10	1,3	0,1	0

11E	Casa Branca (5)	Início de Operação:	Jun.1978 / Out.2000
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
abr/94	20	0,08	--
abr/97	21	0,09	--
abr/99	21	0,09	--
jun/00	18	0,09	--
out/00	Regeneração ou Troca do OMI		
out/00	40	0,01	--
dez/01	36,5	0,01	--
nov/03	36	0,01	--
jul/05	31	0,02	0,8
jul/06	31	0,02	0,9
jul/07	30,5	0,02	0,91
ago/08	30	0,02	--
jun/09	29,5	0,02	1,2
mai/10	30,6	0,01	1,6
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
fev/93	0,008	--	--
jan/95	0,127	--	--
abr/97	0,159	0,006	--
abr/99	0,363	0,01	--
out/00	Regeneração ou Troca do OMI		
dez/01	0,184	0	--
mar/02	0,244	0,003	--
abr/04	0,33	0	--
jan/07	0,22	0	--
nov/09	0,55	0,03	--
mai/10	0,6	0	0

12E	Botucatu (35)	Início de Operação:	Fev.1982 / Set.1995
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
fev/95	31	0,02	--
set/95	Regeneração ou Troca do OMI		
set/95	43,5	0,01	--
jan/00	35	0,02	--
nov/00	34	0,02	--
jan/02	33	0,02	--
jun/03	28	0,01	--
jun/04	25	0,02	2,6
mai/05	25	0,02	3,3
mai/06	25	0,02	2,2
mai/07	25	0,02	2
set/09	25	0,03	2,64
mai/10	27,8	0,01	4,3
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
dez/95	0,12	0,007	--
set/95	Regeneração ou Troca do OMI		
jan/96	0,014	--	--
fev/96	0,163	0,009	--
mar/96	0,177	0,011	--
abr/96	0,198	0,009	--
mai/96	0,179	0,008	--
jan/00	0,188	0,013	--
jan/02	0,211	0,017	--
jun/03	0,74	0,02	--
mai/05	0,74	0,02	--
mai/07	0,19	0,04	--
set/09	0,68	0	--
mai/10	0,7	0	0

13E	Botucatu (37)	Início de Operação:	Mar.1981 / Nov.2001
Análises Físico-Químicas			
Data	Tensão Interfacial dina/cm	Índice de Neutralização mg KOH/ g OMI	Fator de Potência a 90°C %
mai/00	17	0,12	--
abr/01	17	0,12	--
nov/01	Regeneração ou Troca do OMI		
nov/01	38,5	0,01	--
set/02	32,5	0,01	--
dez/03	33	0,01	--
jun/04	30	0,01	0,8
mai/05	30	0,01	1
mai/06	30	0,01	1
mai/07	30	0,01	0,9
mar/09	30	0,02	0,9
mar/10	30	0,03	1,05
mai/10	29,6	0,01	1,6
Análises Composto Furânicos			
Data	2-FAL mg/L	5-HMF mg/L	2-FOL mg/L
jan/93	0,055	0,001	--
jan/94	0,019	0,004	--
jan/95	0,035	--	--
fev/97	0,05	--	--
jan/00	0,04	0,015	--
abr/01	0,035	0	--
nov/01	Regeneração ou Troca do OMI		
set/02	0,065	0	--
jun/04	0,05	0	--
mai/05	0,1	0	--
mai/07	0,04	0	--
mar/09	0,08	0	--
mai/10	0,1	0	0